

**VALIDIERUNG DER OSSIFIKATION DER MEDIALEN  
CLAVICULAEPIPHYSE MIT DER MAGNETRESONANZTOMOGRAFIE**

**Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades  
doctor medicinae (Dr. med.)

**vorgelegt dem Rat der Medizinischen Fakultät  
der Friedrich-Schiller-Universität Jena**

von Judith Hollnberger  
geboren am 27. Februar 1985 in Regensburg

#### Gutachter

1. Prof. Dr. med. Dipl.-Chem. Werner A. Kaiser  
Institut für Diagnostische und Interventionelle Radiologie,  
Friedrich-Schiller-Universität Jena
2. Univ.-Prof. Dr. med. Gita Mall  
Institut für Rechtsmedizin, Friedrich-Schiller-Universität Jena
3. PD Dr. med. Andreas Schmeling  
Institut für Rechtsmedizin, Westfälische Wilhelms-Universität Münster

Tag der öffentlichen Verteidigung:

01. November 2010

# Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
CT	Computertomografie
EKG	Elektrokardiogramm
FOV	Field-Of-View
GRE	Gradientenecho-Sequenz (Synonym GE)
HASTE	Half Fourier Acquisition Single Shot Turbo Spin Echo
HF	Hochfrequenz
HWT	Halsweichteile
MRI	Magnetic Resonance Imaging
MRT	Magnetresonanztomografie
NMR	Nuclear Magnetic Resonance
Op Ph.	Opposed Phase
PACS	Picture Archiving and Communication System
SE	Spin-Echo-Sequenz
SNR	Signal-To-Noise-Ratio
STIR	Short Tau [TI] Inversion Recovery
Sv	Sievert
T	Tesla
Tab.	Tabelle
TE	Echozeit
TR	Repetitionszeit
Transv.	transversal
TRUFI	True Fast Imaging With Steady Precession
TSE	Turbo-Spin-Echo-Sequenz

# Inhalt

1	Zusammenfassung .....	1
2	Einleitung.....	3
2.1	Gesetzliche Grundlagen zur Altersdiagnostik .....	3
2.2	Aktuell angewandte Methoden der Altersdiagnostik.....	5
2.3	Altersdiagnostik anhand der Sternoklavikulargelenke .....	7
2.4	Prinzip der Magnetresonanztomografie.....	11
2.4.1	Physikalische Grundlagen.....	11
2.4.2	Aufbau eines Magnetresonanztomografen .....	14
2.4.3	Funktionsweise eines Magnetresonanztomografen.....	15
2.4.4	Vorteile und Kontraindikationen .....	21
3	Fragestellung und Ziele .....	23
4	Material und Methoden .....	24
4.1	Patientenkollektiv.....	24
4.2	Durchführung der Untersuchung .....	25
4.3	Datenerhebung und Auswertungskriterien .....	26
4.4	Statistische Methoden .....	30
5	Ergebnisse.....	31
5.1	Stadieneinteilung in Korrelation mit dem Alter der Patienten .....	31
5.2	Altersunterschiede in Abhängigkeit vom Geschlecht.....	35
5.3	Beurteilungsunterschiede in Abhängigkeit von den Aufnahmekriterien .....	37
5.3.1	Vergleich von Thorax- und Halsweichteil-Untersuchungen .....	37
5.3.2	Vergleich von coronaren und transversalen Aufnahmen .....	38
5.3.3	Vergleich von T1-Wichtung und T2-Wichtung.....	39
5.3.4	Vergleich von reinen T1w-/T2w-Sequenzen mit modifizierten Sequenzen .....	43
5.3.5	Vergleich verschiedener modifizierter Sequenzen .....	46

5.4	Ausgewählte Patientenbeispiele .....	49
5.4.1	Beispiele für die Ossifikationsstadien der Clavicula im MRT .....	49
5.4.2	Beispiele für den Vergleich MRT-CT.....	50
5.4.3	Beispiele für Patienten mit Seitendifferenz .....	53
5.4.4	Beispiele für verschiedene Aufnahmearten im Vergleich.....	54
5.4.5	Beispiele für Patienten im Verlauf .....	58
6	Diskussion .....	60
6.1	Vergleichende Betrachtung der Ergebnisse .....	60
6.2	Empfehlungen für die Anwendung der MRT zur Beurteilung der Sternoklavikulargelenke.....	63
6.3	Vergleichende Auswertung von MRT- und CT-Aufnahmen .....	65
6.4	Methodik der Datenerhebung .....	66
6.5	Vorteile und Nachteile der Altersdiagnostik mittels MRT .....	67
6.6	Ausblick auf weitere Möglichkeiten der Altersdiagnostik .....	68
7	Schlussfolgerungen .....	70
	Literaturverzeichnis .....	71
	Anhang .....	75
	Danksagung.....	75
	Ehrenwörtliche Erklärung.....	76

## 1 Zusammenfassung

Neben rein medizinischen Indikationen ist es vor allem auch die Schnittstelle von Rechtswesen und Medizin, die an der Altersdiagnostik bei Jugendlichen und jungen Erwachsenen interessiert ist. So ist es in diesem Bereich um das 18. bzw. 21. Lebensjahr wichtig, das genaue Alter auch unabhängig von der Aussage einer straffällig gewordenen Person bestimmen zu können, wenn diese, um einer Verurteilung oder Bestrafung zu entgehen, ein jüngeres als das tatsächliche Alter angibt. Aktueller Goldstandard für diese forensische Altersdiagnostik ist unter anderem eine CT-Aufnahme der Sternoklavikulargelenke. Dabei wird die Ossifikation der medialen Claviculaepiphyse in charakteristische Reifungsstadien eingeteilt, mit Hilfe derer dann Rückschlüsse auf das Alter der untersuchten Person gezogen werden können. Da diese CT-Untersuchung mit einer nicht zu vernachlässigenden Strahlenbelastung einher geht und überwiegend an gesunden, jungen Menschen durchgeführt werden muss, ist es das Ziel dieser Arbeit, die Bestimmung der Entwicklungsstufen der medialen Claviculaepiphyse mit Hilfe von MRT zu untersuchen und so eine unbedenklichere Untersuchungsmethode ohne Strahlenbelastung zu ermöglichen.

In die Studie wurden 339 Patienten zwischen 10 und 30 Jahren einbezogen und sowohl Thorax- als auch Halsweichteil-MRT-Aufnahmen ausgewertet. Darüber hinaus wurden Schnittebene, Sequenz, Wichtung, Schichtdicke, Repetitionszeit und Echozeit dokumentiert und beurteilt. Neben der Ermittlung der Altersbereiche für die Entwicklungsstufen der Clavicula wurden Empfehlungen erarbeitet, mit welchen Kriterien das Sternoklavikulargelenk am besten im MRT dargestellt werden kann. Die Einteilung der Ossifikation der Clavicula erfolgte in Analogie zur Literatur in vier Stadien nach Kreitner et al.: In Stadium 1 ist kein Knochenkern vorhanden. In Stadium 2 ist ein isolierter Knochenkern erkennbar. In Stadium 3 erfolgt eine partielle Verschmelzung des Knochenkernes mit der Clavicula. Diese Fusion ist in Stadium 4 schließlich vollständig. Für diese vier Entwicklungsstadien konnten charakteristische Altersstufen ermittelt werden: Personen in Stadium 1 waren zwischen 10 und 17 Jahren alt (mittleres Alter 13,6 Jahre). Erstmals ein Knochenkern und damit Stadium 2

erreichten die Patienten zwischen 13 und 19 Jahren (mittleres Alter 16,3 Jahre). Für Stadium 3 konnte ein mittleres Alter von 18,6 Jahren und ein Altersbereich von 15 bis 22 Jahren ermittelt werden. Stadium 4 und damit die vollständige Verknöcherung der Claviculaepiphyse konnte für Personen ab 19 Jahren und mit einem mittleren Alter von 25,3 Jahren nachgewiesen werden. Diese charakteristischen Altersunterschiede zwischen den Entwicklungsstadien der Clavicula erwiesen sich als statistisch signifikant und weitgehend übereinstimmend mit denen der CT-Referenzstudien. Darüber hinaus konnten keine statistisch signifikanten Unterschiede in den Entwicklungsstufen der Clavicula zwischen weiblichen und männlichen Patienten ermittelt werden. Ebenso waren Asymmetrien in der Entwicklung von rechter und linker Clavicula nicht statistisch signifikant. Auch diese Ergebnisse decken sich mit den CT-Studien. Bei den Aufnahmekriterien im MRT konnte ein signifikanter Vorteil der Halsweichteil- gegenüber den Thorax-Untersuchungen erarbeitet werden. Dies trifft ebenso für die coronaren gegenüber den transversalen Schnittbildern zu. Bezüglich der Wichtung der MRT-Aufnahmen konnte kein wesentlicher Unterschied zwischen T1w und T2w ermittelt werden, jedoch konnten sowohl mit reinen T1w- als auch mit reinen T2w-Aufnahmen signifikant bessere Ergebnisse erzielt werden als mit modifizierten Sequenzen wie In-Phase oder Opposed-Phase. Dies lässt den Schluss zu, dass das Sternoklavikulargelenk im MRT am besten als coronare Halsweichteil-Aufnahme mit einer Schichtdicke von 3mm in T1w/T2w dargestellt werden kann. Lagen bei einem Patienten zum annähernd selben Untersuchungszeitpunkt sowohl eine CT- als auch eine MRT-Aufnahme vor, wurden die Sternoklavikulargelenke nach beiden Methoden analysiert. Die Beurteilbarkeit war in allen Fällen vergleichbar, ebenso wie das ermittelte Reifungsstadium der Claviculaepiphyse.

Diese Ergebnisse zeigen, dass die Beurteilung der Ossifikation der medialen Claviculaepiphyse mit der Magnetresonanztomografie ebenso möglich ist wie mit der Computertomografie. Allerdings hat erstere den entscheidenden Vorteil, dass kein Kompromiss aufgrund der Strahlenbelastung für die gesunden jungen Menschen eingegangen werden muss. Es bleibt abzuwarten, ob diese neue Methode Eingang finden wird in die Praxis der forensischen Altersdiagnostik.

## 2 Einleitung

### 2.1 Gesetzliche Grundlagen zur Altersdiagnostik

Wie anhand des aktuell vorliegenden Datenreports 2008 des Statistischen Bundesamtes ersichtlich ist, wurden im Jahr 2006 junge Menschen im Alter zwischen 18 und 21 Jahren etwa dreimal so häufig straffällig wie Erwachsene. Darüber hinaus zeigen Analysen der letzten Jahrzehnte, dass die Zahl der (männlichen) Jugendlichen und Heranwachsenden, die wegen Verbrechen und Vergehen verurteilt wurden, seit Beginn der 1990er Jahre im Ansteigen begriffen ist (Vgl. Abb. 1) (Bundesamt 2008).

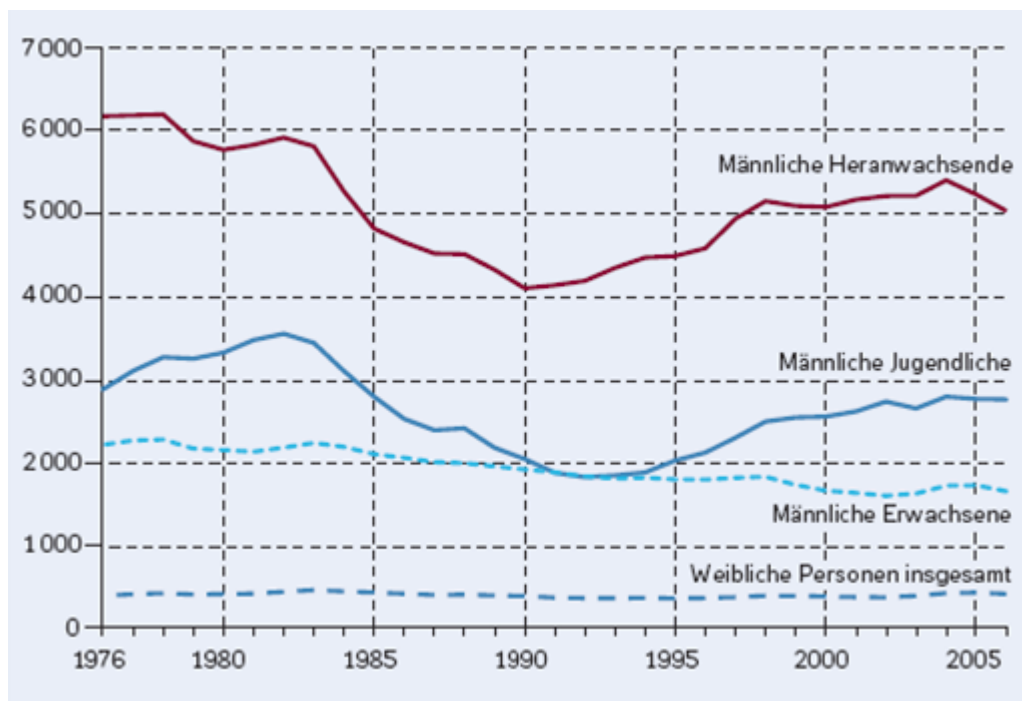


Abb. 1 Wegen Verbrechen und Vergehen verurteilte Deutsche 2006 je 100 Einwohner.

Befasst man sich mit diesen Altersgruppen der Jugendlichen und Heranwachsenden im Kontext von Strafverfahren, so sind in Deutschland bestimmte Altersgrenzen zu beachten: Kinder unter 14 Jahren können strafrechtlich nicht belangt werden. Ab dem 14. Lebensjahr bis zum vollendeten 18. Lebensjahr gilt das Jugendstrafrecht, bei dem der Erziehungsgedanke im Vordergrund steht. Heranwachsende von 18 bis 21 Jahren



können nach dem allgemeinen Strafrecht verurteilt werden, allerdings ist in Deutschland die Anwendung von Jugendstrafrecht der Regelfall, wenn „1. *die Gesamtwürdigung der Persönlichkeit des Täters bei Berücksichtigung auch der Umweltbedingungen ergibt, dass er zur Zeit der Tat nach seiner sittlichen und geistigen Entwicklung noch einem Jugendlichen gleichstand, oder 2. es sich nach der Art, den Umständen oder den Beweggründen der Tat um eine Jugendverfehlung handelt*“ (§105 Jugendgerichtsgesetz JGG). Ab dem 21. Lebensjahr gilt das allgemeine Strafrecht.

Aus diesen Angaben ergibt sich, welche Rolle das Alter des Tatverdächtigen bzw. Täters für die Verurteilung spielt. Gerade Jugendliche oder junge Erwachsene, die im Zuge der zunehmenden grenzüberschreitenden Migrationsbewegungen nach Deutschland einwandern, sind häufig nicht im Besitz gültiger oder glaubwürdiger Ausweispapiere, die ihr tatsächliches Alter nachweisen könnten (Lockemann et al. 2004, Olze et al. 2006). Diese Umstände stellen im Falle eines Vergehens die ermittelnden Behörden vor die Problematik, welches Strafrecht bei dem Tatverdächtigen bzw. Täter korrekterweise angewendet werden muss. Vor allem auch, da die straffällig gewordenen Jugendlichen oder Heranwachsenden des Öfteren in Kenntnis der deutschen Altersgrenzen des Strafrechts sind und auf diese Weise ein für ihre Verurteilung vorteilhaftes, falsch niedriges Lebensalter angeben (Schmeling 2004).

Hieraus wird ersichtlich, dass die Altersdiagnostik gerade bei Jugendlichen und jungen Erwachsenen in hohem Maße wichtig für eine korrekte Behandlung und Verurteilung bei kriminellen Delikten ist (Schmeling et al. 2007, Thali und Dirnhofer 2004).

## 2.2 Aktuell angewandte Methoden der Altersdiagnostik

In Deutschland basiert die Altersdiagnostik bei Jugendlichen und jungen Erwachsenen aktuell auf drei Säulen:

- Eine körperliche Untersuchung mit Erfassung anthropometrischer Masse (Körpergröße und -gewicht, Körperbautyp), sexueller Reifezeichen wie Körperbehaarung, Stimmbruch oder Menarche, sowie möglicher altersrelevanter Entwicklungsstörungen (Schmeling et al. 2000a, Schmeling et al. 2001b). Zur Klassifizierung der Entwicklungsstadien werden diesbezüglich auch die Einteilungen von Tanner und Whitehouse (Tanner und Whitehouse 1976) bzw. Marshall und Tanner (Marshall und Tanner 1970, Marshall und Tanner 1969) herangezogen .

- Eine Röntgenuntersuchung der linken Hand, um die Ossifikationsstadien der differenzierten Handknochen zu evaluieren.

Eine in der Praxis gängige Methode dafür ist die Altersbestimmung nach Greulich und Pyle. Als Atlas zusammengefasst bietet diese die Möglichkeit eines direkten visuellen Vergleichs der Handknochen des Jugendlichen mit den Standards des Atlas (Greulich und Pyle 1976). Als Referenz für die physiologische Entwicklung der Handknochen kann der Atlas nach Thiemann und Nitz herangezogen werden (Thiemann und Nitz 1986).

Da die Handröntgenaufnahme den besten Indikator zur Bestimmung der skelettalen Reife darstellt und in engem Zusammenhang zur Wachstumskurve steht, gilt sie aktuell in diesem Zusammenhang als Goldstandard.

- Eine zahnärztliche Untersuchung mit Erhebung des Zahnstatus und einer Röntgenuntersuchung des Gebisses, um die Entwicklungsstadien der bleibenden Zähne, die Kalzifizierung der Zahnwurzeln sowie den Abschluss der Wurzelbildung der Weisheitszähne zu beurteilen (Ritz et al. 1995, Rösing et al. 2007).

Darüber hinaus sollten weitere Faktoren wie sozioökonomischer Status oder entwicklungsbeeinflussende Erkrankungen des Jugendlichen oder jungen Erwachsenen mit einbezogen werden.

Indem parallel mehrere Verfahren zur Altersdiagnostik herangezogen werden, kann hierbei eine hohe Sicherheit und Qualität gewährleistet werden.

Empfehlungen für die Gutachtenerstattung und Qualitätssicherung im Kontext der forensischen Altersdiagnostik werden seit dem Jahr 2000 von der interdisziplinären „Arbeitsgemeinschaft für Forensische Altersdiagnostik (AGFAD)“, bestehend aus Rechtsmedizinern, Zahnmedizinern, Radiologen und Anthropologen, entwickelt und aktualisiert (Lockemann et al. 2004, Schmeling et al. 2008, Schmeling et al. 2001c). Die AGFAD ist bei der „Deutschen Gesellschaft für Rechtsmedizin (DGRM)“ angesiedelt.

Da die Methoden der radiologischen Handuntersuchung nur den Altersbereich bei männlichen Jugendlichen bis zum 17. Lebensjahr bzw. bei weiblichen Jugendlichen bis zum 15. Lebensjahr (Greulich 1950), und die zahnmedizinischen Untersuchungen in der Regel den Altersbereich bis zum 21. Lebensjahr abdecken (Olze et al. 2006), hat sich ein neues Verfahren etabliert, mit dem auch eine Altersdiagnostik über diese Bereiche hinaus möglich ist: eine radiologische Untersuchung mittels konventionellem Röntgen (Ogden et al. 1979a, Ogden et al. 1979b, Schmeling et al. 2004) oder Computertomografie der Schlüsselbeine (Destouet et al. 1981, Hatfield et al. 1984, Lucet et al. 1996). Dabei wird die Ossifikation der medialen Enden der Claviculae bzw. der Sternoklavikulargelenke beurteilt und daraus auf das Alter der zu untersuchenden Person geschlossen (Schulz et al. 2005, Schulz et al. 2008a).

Aufgrund der zentralen Stellung dieser Methode wird darauf im folgenden Kapitel ausführlich eingegangen.

## 2.3 Altersdiagnostik anhand der Sternoklavikulargelenke

Die Clavicula (lat. das Schlüsselbein) ist ein 12 bis 15 cm langer, S-förmig gekrümmter Knochen, der als Bestandteil des Schultergürtels medial mit dem Sternum und lateral mit dem Acromion der Scapula verbunden ist (Benninghoff und Drenckhahn, Kumar et al. 1989). So entsteht lateral das Articulatio acromioclavicularis und medial das Articulatio sternoclavicularis (siehe Abb. 2) (Rohen et al. 2002).

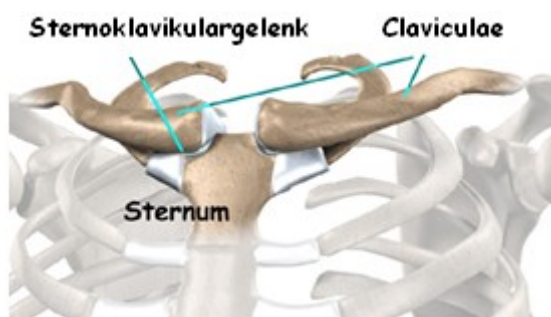


Abb. 2 Anatomie der Sternoklavikulargelenke (Traumatology 2009).

Beim Menschen nimmt die Clavicula durch ihre Entwicklung eine Sonderstellung ein: sie stellt den einzigen Extremitätenknochen dar, der zu einem großen Teil nicht knorpelig vorgeformt wird, also durch eine membranöse (desmale) Ossifikation entsteht. Lediglich in den Enden ist jeweils ein Knorpelkern zu finden (chondrale Osteogenese) (Groskopf und Tischendorf 1964). Darüber hinaus ist der Schlüsselbeinkörper das erste verknöchernde Skelettelement des Menschen. Von einem medialen und einem lateralen Zentrum aus beginnt zwischen der fünften und sechsten Entwicklungswoche die Ossifikation (Flecker 1932). In den Epiphysen dagegen entwickelt sich erst zu Beginn der Pubertät ein Knochenkern (sekundäres Ossifikationszentrum). Von diesem Knochenkern aus wird nach und nach die gesamte knorpelige Epiphyse durch Knochen ersetzt, mit Ausnahme der Epiphysenfugen, die sich erst nach Abschluss des Längenwachstums mit dem Ende der Pubertät endgültig schließen (Lippert 2003, Fawcett 1913).

Außerdem findet sich neben einer Zunahme des kortikalen Index der Clavicula, also dem Verhältnis der Dicke der Kortikalis zum Gesamtdurchmesser des Knochens (Fujita et al. 1968, Helela 1969, Kaur und Jit 1990), eine charakteristische Formveränderung der medialen Claviculaenden in ihrer Entwicklung bis zum Erwachsenenalter. Während der ersten Lebensdekade zeigt sich eine sogenannte „Pilzform“, verbunden mit glatten, auch unregelmäßigen Rändern. Zwischen dem 10. und 20. Lebensjahr geht diese in eine sogenannte „Becherform“ mit häufig irregulären Konturen über. Ab Mitte der dritten Lebensdekade schließlich findet man die sogenannte „Stempelform“ des sternalen Claviculaendes, häufig verbunden mit einer zentralen Einkerbung der Gelenkfläche (Köhler et al. 2001).

Diese verschiedenen Entwicklungsstufen der medialen Claviculaepiphyse hat man sich zu Nutze gemacht, um einen Zusammenhang mit dem skelettalen Alter der jeweiligen Person herstellen zu können und so auch eine Aussage im Rahmen einer forensischen Altersdiagnostik bei Jugendlichen und jungen Erwachsenen treffen zu können.

Eine Bewertung der Entwicklung anhand der Ossifikation der medialen Claviculaenden haben Kreitner et al. (Kreitner et al. 1998), modifiziert nach Webb und Suchey (Webb und Suchey 1985) sowie Jit und Kulkarni (Jit und Kulkarni 1976), vorgenommen. Retrospektiv wurden 380 CT-Aufnahmen der medialen Claviculaepiphyse aus dem Zeitraum September 1989 bis März 1997 von 229 männlichen und 151 weiblichen Patienten zwischen 0 und 30 Jahren ausgewertet. Voraussetzung war, dass die Patienten keine Störungen der Knochenentwicklung aufwiesen und die Sternoklavikulargelenksregion ausreichend gut dargestellt war. Die Einteilung der Entwicklungsstufen erfolgte in vier Stadien (siehe Abb. 3): Im Stadium 1 findet sich keine Ossifikation der medialen Epiphyse der Clavicula, im Stadium 2 ein Ossifikationskern, der allerdings nicht mit der Diaphyse verschmolzen ist. Im Stadium 3 kann man eine partielle Verschmelzung und im Stadium 4 schließlich eine vollständige Fusion der ossifizierten Epiphyse mit der Diaphyse der Clavicula erkennen.

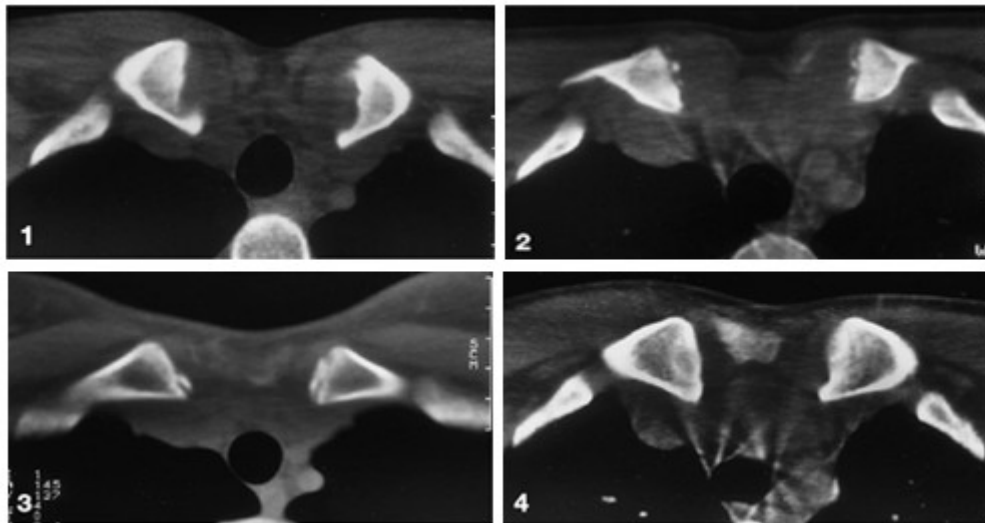


Abb. 3 Stadien der Claviculaentwicklung im CT (Kreitner et al. 1998).

**Altersverteilung anhand der Entwicklungsstadien der Clavicula  
(Kreitner et al. 1998).**

Alter (Jahre)	Stadium 1		Stadium 2		Stadium 3		Stadium 4		Total
	n	(%)	n	(%)	n	(%)	n	(%)	
0-4	18	(100%)	0	-	0	-	0	-	18
5-9	22	(100%)	0	-	0	-	0	-	22
10	7	(100%)	0	-	0	-	0	-	7
11	7	(83%)	1	(17%)	0	-	0	-	7
12	5	(100%)	0	-	0	-	0	-	5
13	8	(73%)	3	(27%)	0	-	0	-	11
14	5	(38%)	8	(62%)	0	-	0	-	13
15	2	(11%)	16	(89%)	0	-	0	-	18
16	1	(5%)	16	(84%)	2	(11%)	0	-	19
17	0	-	9	(69%)	4	(31%)	0	-	13
18	0	-	10	(59%)	7	(41%)	0	-	17
19	0	-	5	(25%)	15	(75%)	0	-	20
20	0	-	1	(5%)	21	(95%)	0	-	22
21	0	-	0	-	15	(100%)	0	-	15
22	0	-	1	(6%)	14	(88%)	1	(6%)	16
23	0	-	0	-	12	(55%)	10	(45%)	22
24	0	-	0	-	6	(30%)	14	(70%)	20
25	0	-	0	-	5	(15%)	29	(85%)	34
26	0	-	0	-	2	(7%)	25	(93%)	27
27	0	-	0	-	0	-	17	(100%)	17
28	0	-	0	-	0	-	23	(100%)	23
29	0	-	0	-	0	-	13	(100%)	13
Total	75	(20%)	70	(18%)	103	(27%)	132	(35%)	380

Tab. 1

Die Zuordnung der Stadien in den CT-Aufnahmen zum jeweiligen Lebensalter der Patienten erbrachte folgendes Ergebnis: Stadium 1 trat bei Patienten bis zum 16. Lebensjahr auf, Stadium 2 zwischen dem 11. und 22. Lebensjahr. Stadium 3 konnte zwischen dem 16. und 26. Lebensjahr beobachtet werden, Stadium 4 und damit die vollständige Verschmelzung von Epi- und Diaphyse erstmals mit 22 Jahren und bei allen Patienten ab 27 Jahren (Vgl. Tab. 1).

Unter Einbeziehung eines 95%-Konfidenzintervalles ergibt sich für Stadium 1 ein Altersbereich von 0 bis 16 Jahren, für Stadium 2 ein mittleres Alter von 16,1 Jahren mit einer Standardabweichung von 1,9 Jahren und einem Vertrauensbereich von 12,3 bis 19,9 Jahren, für Stadium 3 ein mittleres Alter von 20,9 Jahren mit einer Standardabweichung von 2,2 Jahren und einem Vertrauensbereich von 16,5 bis 25,5 Jahren. Stadium 4 beginnt mit 22 Jahren. Ein Ossifikationskern trat also erstmals zwischen 11 und 22 Jahren auf und eine partielle Fusion zwischen 16 und 26 Jahren. Der jüngste Patient mit einer vollständigen Verschmelzung von Epiphyse und Diaphyse war 22 Jahre alt, ab 27 Jahren konnte diese bei allen Patienten festgestellt werden.

Eine Ergänzung zu dieser Stadieneinteilung erbrachten 2003 Schmeling et al. (Schmeling et al. 2003). In einem Zeitraum von 1995 bis 2002 wurden in einer retrospektiven Untersuchung 873 konventionelle Thorax-Röntgenaufnahmen bei 16- bis 30-jährigen Patienten in Bezug auf die Ossifikation der medialen Claviculaepiphyse analysiert. Zusätzlich zu den vier bereits etablierten Stadien wurde ein fünftes Stadium benannt, in dem neben der vollständigen Fusion von Epiphyse und Diaphyse die Verschmelzungslinie nicht mehr erkennbar ist. Erreicht wird dieses fünfte Stadium erstmals mit 26 Jahren.

Bei der Beurteilung der MRT-Aufnahmen im Rahmen dieser Arbeit soll auf die Stadieneinteilung nach Kreitner et al. Bezug genommen werden.

## 2.4 Prinzip der Magnetresonanztomografie

In den 70er Jahren des vorherigen Jahrhunderts wurde die Magnetresonanztomografie (MRT, Kernspin-Tomografie, Magnetic Resonance Imaging MRI, Nuclear Magnetic Resonance NMR) erstmals am Menschen angewandt, zu Beginn der 80er Jahre hielt sie Einzug in die klinische Anwendung. 2003 schließlich erhielten Lauterbur und Mansfield den Nobelpreis in Physiologie und Medizin für die Entwicklung der heutigen Magnetresonanztomografie.

Im Folgenden sollen nun die physikalischen Grundlagen, Aufbau bzw. Funktionsweise des Magnetresonanztomografen sowie Vorteile und Kontraindikationen erläutert werden.

### 2.4.1 Physikalische Grundlagen

Die Bilddarstellung in der MRT beruht auf einer grundlegenden Eigenschaft der Elementarteilchen, dem sogenannten Spin (engl. „to spin“=sich drehen). Dieser bewirkt, dass die Elementarteilchen bzw. Atomkerne mit von Null verschiedenem (Gesamt-)Spin ein magnetisches Moment besitzen. Dadurch können die Teilchen sowohl von elektromagnetischen Feldern beeinflusst werden als auch diese selbst erzeugen (Zink und Herborn 2007). Im klinischen MRT spielt dabei nahezu ausschließlich der Kern des Wasserstoffatoms  $^1\text{H}$  (Proton) eine Rolle (Reiser 1992).

Befindet sich ein Proton nun in einem äußeren Magnetfeld ( $B_0$ ), bewegt sich der Spin in einer Präzessionsbewegung mit einer charakteristischen Frequenz, der Larmorfrequenz, um die Achse des äußeren Feldes. Dabei ist die Larmorfrequenz proportional zur Stärke des äußeren Magnetfeldes. Im thermischen Gleichgewicht richtet sich die Rotationsachse der Spins entlang dieses Feldes aus. Haben sich insgesamt mehr Spins entlang des äußeren Magnetfeldes ausgerichtet, entsteht eine Längsmagnetisierung ( $M_0$ ) in Z-Richtung, also senkrecht zur horizontalen XY-Ebene (siehe Abb. 4).



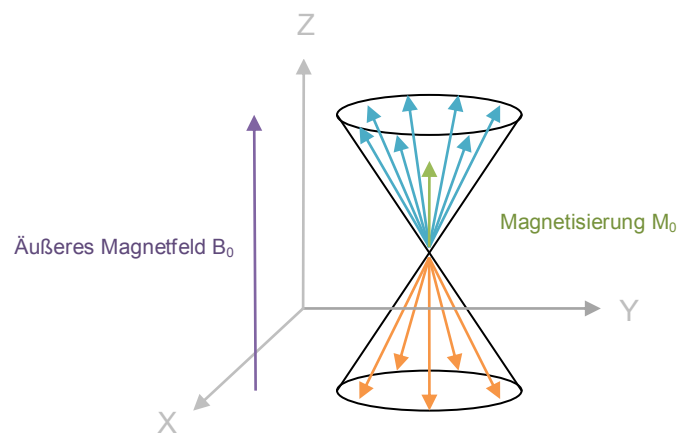


Abb. 4 Präzessionsbewegung der Spins im äußeren Magnetfeld.

Wird nun dieses stabile Spin-System durch ein HF-Feld mit Larmorfrequenz angeregt, verlassen die Spins die Z-Richtung und kippen um  $90^\circ$  in die XY-Ebene (Anregung des Spin-Systems). Da die Spins aber erneut das Bestreben haben, sich entlang des äußeren Magnetfeldes auszurichten, präzedieren sie zusammen mit ihrem magnetischen Summenvektor zurück in Z-Richtung. Diese Bewegung induziert eine Wechselspannung, die von Detektoren erfasst werden kann: das MR-Signal (Weishaupt et al. 2006).

Wie bereits erwähnt treten beim Ausrichten von Spins entlang eines äußeren Magnetfeldes Energieverluste an die Umgebung auf. Dies ist auch der Fall, wenn die Spins nach der Anregung in die Längsrichtung zurückrotieren (Longitudinale Relaxation, siehe Abb. 5). Für diese Abgabe von Energie an die Umgebung wurde die von der Stärke des äußeren Magnetfeldes abhängige Zeitkonstante  $T_1$  definiert.

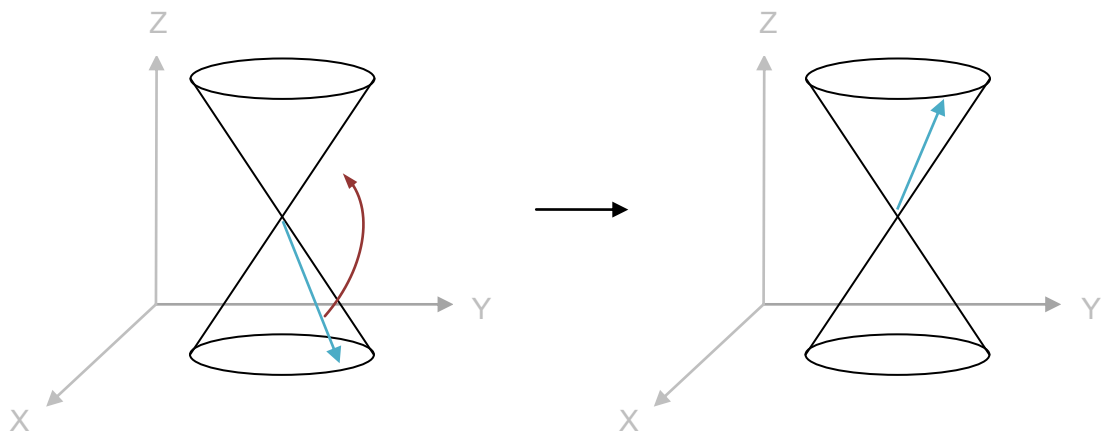


Abb. 5 T1-Relaxation.

Neben dieser Spin-Gitter-Relaxation ist ein zweites Phänomen dafür verantwortlich, dass die transversale Magnetisierung und damit auch das MR-Signal abnimmt: die Spin-Spin-Wechselwirkung. Die direkt nach der Anregung mittels elektromagnetischer Wellen bestehende Phasenkohärenz der Spins geht mit der Zeit verloren und damit auch die transversale Magnetisierung (Transversale Relaxation, siehe Abb. 6).

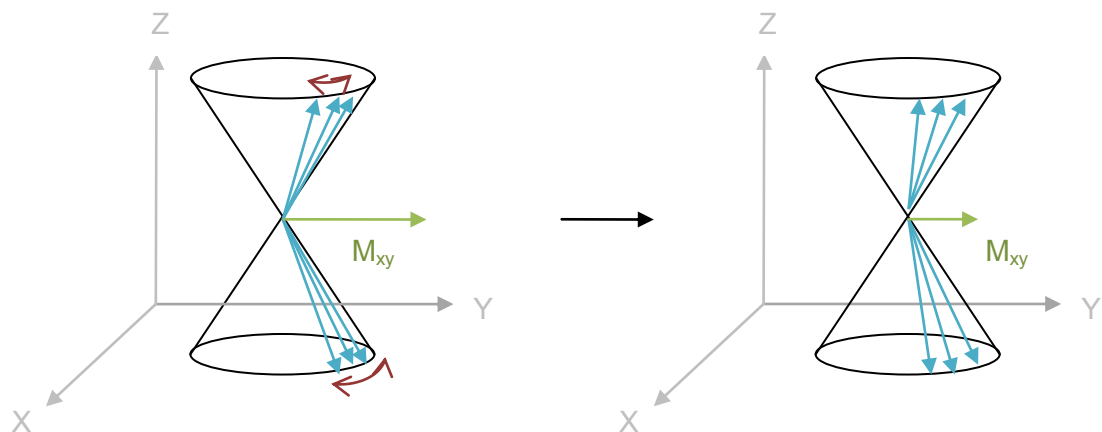


Abb. 6 T2-Relaxation.

Dies beruht zum einen auf fluktuierenden lokalen Magnetfeldern, die eine Dephasierung bewirken (Zeitkonstante T2), und zum anderen auf konstanten

Inhomogenitäten des äußeren Magnetfeldes, die zu einem zusätzlichen Phasenzerfall führen (Zeitkonstante  $T2^*$ ).

Sowohl die Longitudinale als auch die Transversale Relaxation laufen gleichzeitig ab.

### **2.4.2      Aufbau eines Magnetresonanztomografen**

Kernstück eines Magnetresonanztomografen ist der Magnet, der das Hauptmagnetfeld erzeugt. Hauptsächlich im klinischen Einsatz finden sich dafür supraleitende Niobium-Titan-Magnete, deren elektrischer Widerstand mittels Heliumkühlung minimiert wird und so stromunabhängig ein dauerhaftes Magnetfeld (bis 18 T) mit sehr guter Homogenität entsteht. Alternativen zum supraleitenden Magneten sind Resistive Magnete (Elektromagnete) oder Permanentmagnete, die aber kaum Anwendung finden.

Neben diesem Hauptmagneten benötigt man für Schichtwahl und Ortskodierung des MR-Signals (siehe 2.4.3.3) verschiedene Gradientenspulen. Diese erzeugen zwar im Vergleich zum Hauptmagneten wesentlich geringere Magnetfelder, benötigen aber beim Ein- und Ausschalten hohe Stromstärken, welche ursächlich für das charakteristische „Hämmern“ während der Messungen des Magnetresonanztomografen sind.

Wie in Kapitel 2.4.1 erläutert, wird zur Anregung der Spins ein HF-Feld erzeugt, ebenso muss das vom System ausgesandte MR-Signal detektiert werden. Hierzu beinhaltet der MR-Tomograf ein Hochfrequenz-System (HF-System), bestehend aus einem Hochfrequenzsender und einem hochempfindlichen Empfänger (Rummeny und Beer 2002). Technisch umgesetzt wird dies entweder durch separate Sende- und Empfangsspulen (HF-Spulen), oder eine kombinierte Spule sowohl für Senden als auch für Empfangen (Vgl. Abb. 7).

Ergänzt wird der MR-Tomograf durch diverse Computer (Hauptcomputer, Steuercomputer, Rekonstruktionscomputer) und Hilfsgeräte wie EKG-/Atmungsmonitoren, Steuerung des Untersuchungstisches, Kühlanlagen und Bearbeitungskonsolen (Weishaupt et al. 2001).

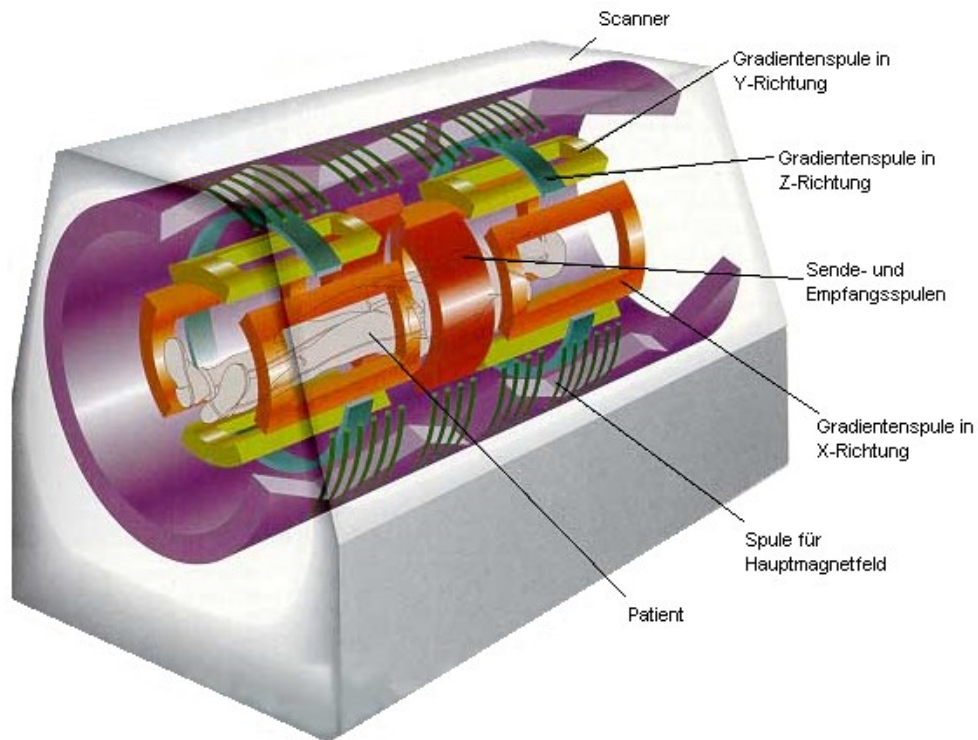


Abb. 7 Aufbau eines Magnetresonanztomografen (Pictures 2009).

## 2.4.3 Funktionsweise eines Magnetresonanztomografen

### 2.4.3.1 Wichtung einer MRT-Aufnahme

In Kapitel 2.4.1 wurden die Grundlagen von Anregung, Relaxation, T1- und T2-Zeit besprochen. Letztere bestimmen die sogenannte Wichtung eines MRT-Bildes: T1-gewichtete Aufnahmen (T1w) werden in ihrer Helligkeit, also im Bildkontrast, in erster Linie davon beeinflusst, wie schnell die angeregten Spins des Gewebes erneut anregbar sind. Bei T2-gewichteten Aufnahmen (T2w) ist für den Kontrast vor allem die Abklingzeit des MR-Signals nach der Anregung von Bedeutung. Darüber hinaus bestimmt ein dritter Gewebeparameter den Bildkontrast: die Protonendichte (Anzahl anregbarer Spins pro Volumeneinheit). Derart betonte Aufnahmen werden als Protonen-gewichtet (PDw), Dichte-gewichtet (proton-density-weighted) oder intermediär gewichtet (intermediated-weighted) bezeichnet (Reimer 2003).

Durch diese Parameter lassen sich, aufgrund der spezifischen Merkmale verschiedener Gewebe, Kontraste zwischen den Geweben erzeugen, wodurch man diese voneinander abgrenzen kann und ein aussagekräftiges Bild (auch ohne den Einsatz von Kontrastmittel) entsteht.

#### **2.4.3.2 Repetitionszeit TR und Echozeit TE**

Neben der Wichtung der Aufnahme spielt auch die Wahl von Repetitionszeit (TR) und Echozeit (TE) eine entscheidende Rolle für den Bildkontrast.

Als Repetitionszeit TR wird die Zeit bezeichnet, die zwischen zwei aufeinanderfolgenden Anregungen einer Schicht vergeht. Abhängig von der Länge dieser Zeit variiert die Gesamtzahl der wieder relaxierten Spins, sodass unterschiedlich viel Längsmagnetisierung für die folgende Anregung zur Verfügung steht und das MR-Signal entsprechend in seiner Größe bestimmt wird. Wählt man eine kurze TR, erhält man von Gewebe mit kurzer T1-Zeit also viel Signal (hell im Bild), von Gewebe mit langer T1-Zeit wenig Signal (dunkel im Bild). Wird hingegen eine lange TR gewählt, erhält man sowohl von Gewebe mit kurzem als auch von Gewebe mit langem T1 relativ viel Signal und entsprechend einen geringen Bildkontrast. Mithilfe einer kurzen Repetitionszeit kann folglich eine starke T1-Gewichtung erreicht werden.

Mit Echozeit TE wird die Zeit bezeichnet, die zwischen Anregung einer Schicht und Messung des MR-Signals aus dieser Schicht vergeht. Mit der Wahl dieser Zeitspanne bestimmt man, in wie weit die durch Magnetfeldinhomogenitäten außer Phase gebrachten Spins wieder phasenkohärent sind und somit ein vollständiges MR-Signal abgeben. Wählt man eine lange TE, erhält man von Gewebe mit kurzer T2-Zeit also wenig Signal (dunkel im Bild), von Gewebe mit langer T2-Zeit relativ viel Signal (hell im Bild). Bei Wahl einer kurzen TE hingegen wird nur ein geringer Bildkontrast erreicht, da sowohl von Geweben mit kurzer als auch von Geweben mit langer T2-Zeit vergleichbar viel Signal einstrahlt. Mittels einer langen Echozeit kann demnach eine starke T2-Gewichtung erreicht werden (Schild 1997).

### 2.4.3.3 Schichtwahl und Ortskodierung

Neben T1-, T2-, Repetitions- und Echozeit ist in der Magnetresonanztomografie die Schichtwahl und Ortskodierung des MR-Signals von großer Bedeutung für die Erstellung eines aussagekräftigen Bildes.

Um den Ursprung des Signals exakt definieren zu können, muss zunächst die Schicht festgelegt werden. Dazu wird ein Gradient an das Magnetfeld entlang des Körpers der untersuchten Person angelegt, sodass am Kopfbende des Patienten ein stärkeres Magnetfeld als am Fußende herrscht. Da wie oben erläutert die Larmorfrequenz proportional zum äußeren Magnetfeld ist, präzedieren also die Spins am Kopfbende mit einer höheren Larmorfrequenz als am Fußende. So ist nun jede Schicht durch eine spezifische Larmorfrequenz definiert und kann selektiv angeregt werden. Die Schicht kann dabei beliebig positioniert werden. Darüber hinaus kann die Schichtdicke durch Wahl der Gradientenstärke und Bandbreite des HF-Feldes festgelegt werden. Bei konstanter Bandbreite benötigen dünne Schichten einen stärkeren Gradienten, dickere Schichten einen geringeren Gradienten.

Es existieren nun zwei Möglichkeiten, um eine genaue Ortsauflösung des MR-Signals innerhalb der definierten Schicht erhalten zu können: Frequenz- und Phasenkodierung. Bei der Frequenzkodierung wird während der Aufnahme des MR-Signals ein zusätzlicher statischer Magnetfeldgradient angelegt, der unterschiedliche Larmorfrequenzen in den verschiedenen Zeilen der Schicht zur Folge hat. Damit ist die angeregte Spindichte innerhalb einer Zeile direkt mit der entsprechenden Frequenz im Spektrum des (gesamten zeitabhängigen) MR-Signals verknüpft.

Bei der Phasenkodierung wird nur kurzzeitig ein Magnetfeldgradient angelegt, der durch die (zeitlich begrenzte) unterschiedliche Larmorfrequenz zwischen verschiedenen Zeilen einen Phasengradienten bewirkt. Anschließend wird das MR-Signal zu einem festen Zeitpunkt gemessen.

Durch Variation der Gradientenstärke und wiederholte Messung des MR-Signals kann aus dem gewonnenen Datensatz die Spindichte jeder Zeile und damit das orts aufgelöste MR-Signal durch Fourier-Transformation rekonstruiert werden (Reiser 1997).

#### 2.4.3.4 Signal-zu-Rausch-Verhältnis

Auch bei regelrechtem Anfertigen einer MRT-Aufnahme gibt es verschiedene Faktoren (thermisches und physiologisches Rauschen, Magnetfeldinhomogenitäten, Körper- oder Atembewegungen des Patienten u.a.), die dazu führen, dass ein sogenanntes „Bild-Rauschen“ entsteht, was sich wiederum störend auf das MR-Signal auswirkt. Um ein hochwertiges und aussagekräftiges MRT-Bild zu erhalten, wird versucht, diese Wechselwirkungen möglichst gering zu halten, also ein hohes Signal-zu-Rausch-Verhältnis („Signal-To-Noise-Ratio“ SNR) zu erreichen.

Tab. 2 zeigt eine Auswahl verschiedener Parameter, die eine Zu- bzw. Abnahme des Signal-Rausch-Verhältnisses bewirken (Köchli und Marinécek 1998).

**Parameter des Signal-Rausch-Verhältnisses**

<b>Zunahmen des SNR</b>	<b>Abnahme des SNR</b>
Größere Schichtdicke	Erhöhung der Bandbreite
Größeres Field-of-view	Verminderung des Field-of-view
Erhöhung von TR	Erhöhung von TE
Erhöhung der Magnetfeldstärke	

Tab. 2

#### 2.4.3.5 Sequenzen im MRT

Wie im Abschnitt „Schichtwahl und Ortskodierung“ erläutert, muss im Ablauf der Entstehung eines MRT-Bildes nach der Phasenkodierung zunächst ein Echo erzeugt werden, bevor die Frequenzkodierung durchgeführt und das MR-Signal gemessen

werden kann. Für die Erzeugung des Echos gibt es zwei grundlegende Möglichkeiten: die Spin-Echo-Sequenz (SE) und die Gradientenecho-Sequenz (GRE, GE).

Bei der SE werden die Spins zunächst immer mit einem  $90^\circ$ -Impuls angeregt, woraufhin sie, wie in 2.4.1 erläutert, dephasieren. Nach der ersten Hälfte der gewünschten Echozeit folgt ein  $180^\circ$ -Impuls, nach Ende der zweiten Hälfte der Echozeit sind die Spins wieder phasenkohärent, das Echo wird ausgesandt. Auf diesem Weg kann der Einfluss von statischen Magnetfeldinhomogenitäten minimal gehalten werden, sodass sich eine sehr gute Bildqualität ergibt. Es resultiert aber auch eine längere Messzeit, wodurch die Empfindlichkeit gegenüber Bewegungsartefakten zunimmt. Neben der SE ist darüber hinaus die sogenannte TSE (Turbo-Spin-Echo-Sequenz) zu erwähnen, welche sich von der SE durch eine höhere Anzahl an  $180^\circ$ -Pulsen unterscheidet.

Bei der GRE dagegen wird nur ein Hochfrequenz-Impuls zur Erzeugung des Echos eingesetzt. Indem man den Frequenzkodiergradienten zunächst mit negativer Polarität anschaltet, dephasieren die Spins, durch anschließend positive Polarität des Gradienten kommt es zur Rephasierung der Spins, das Gradientenecho entsteht. Bei dieser Technik entfällt der zeitaufwendige  $180^\circ$ -Impuls, sodass im Vergleich zur SE wesentlich kürzere TR-Zeiten und damit eine geringere Empfindlichkeit gegenüber Bewegungsartefakten erreicht werden kann. Nachteil dabei ist allerdings, dass kurze TR-Zeiten auch ein vermindertes SNR nach sich ziehen (siehe Abschnitt 2.4.3.4), was sich wiederum negativ auf die Bildqualität auswirkt (Nitz 2007).

Neben diesen Basis-Sequenzen gibt es eine Vielzahl modifizierter Sequenzen, die häufig eine Verkürzung der Messzeit, aber z.B. auch die Hervorhebung oder Unterdrückung bestimmter Gewebe, wie z.B. Fett, zum Ziel haben. An dieser Stelle sollen nur diejenigen genannt werden, die im Zuge dieser Arbeit überwiegend zum Einsatz kamen: HASTE (Half Fourier Acquisition Single Shot Turbo Spin Echo), STIR (Short Tau [TI] Inversion Recovery), TRUFI (True Fast Imaging With Steady Precession) (Reiser 2002).



#### 2.4.3.6 Artefakte im MRT

Wie bei jeder Untersuchungstechnik treten auch bei der Magnetresonanztomografie Artefakte auf, die die Bildqualität nicht unwesentlich beeinflussen. Im Folgenden sollen einige davon kurz besprochen werden.

Durch Atmung, Herzschlag, Darmperistaltik, Blut- und Liquorfluss treten Bewegungs- bzw. Flussartefakte auf. Dies ist zum einen ein räumlicher Versatz und zum anderen sind es sogenannte „Ghosts“, also bandförmige Rauschzonen, die durch eine Mehrfachabbildung des MR-Signals entlang einer Phasenrichtung entstehen. Man begegnet dieser Problematik mit speziellen Kompensationsalgorithmen, Atmungs-/EKG-getriggerten Aufnahmen, medikamentöser Darmruhigstellung oder durch Vorsättigung („Presaturation“) bzw. Vertauschen von Frequenz- und Phasenrichtung.

Darüber hinaus kann ein Hineinfalten von außerhalb des Field-of-View gelegenen Körperregionen in Phasenkodierrichtung auftreten. Durch eine Vergrößerung des Field-of-View, vertauschte Frequenz- und Phasenrichtung oder Vorsättigung kann man den Einfluss dieses Artefakts gering halten.

Aufgrund einer Verschiebung des MR-Signals zwischen Fett und Wasser (bedingt durch die unterschiedliche elektronische Umgebung der Protonen, dem sogenannten Chemical Shift) und einer damit verbundenen Signalauslöschung an der Grenzfläche der Gewebe, kommt es zu einem weiteren Artefakt. Diesem kann man durch eine größere Empfängerbandbreite, Fettunterdrückung oder Phasen- und Frequenz-Umkehr vorbeugen.

Ein weiteres Phänomen im MRT ist die sogenannte Suszeptibilität, d.h. jedes Gewebe oder Material im Körper wird durch das äußere Magnetfeld selbst magnetisch und verursacht so Signalausfälle und Bildverzerrungen durch Feldinhomogenitäten. Verwendet man überwiegend SE-Sequenzen, eine höhere Empfängerbandbreite und eine vertauschte Phasen- bzw. Frequenzrichtung, kann man den Einfluss dieses Artefaktes gering halten.

Neben diesen möglichen Effekten auf die Qualität des MR-Bildes gibt es noch diverse weitere, die hier aber nur kurz genannt werden sollen: Trunkationsartefakte, Magic Angle, „Eddy Currents“, Partialvolumenartefakte, Inhomogene Fettunterdrückung, Linienartefakte („Zipper-Like Artifacts“), Radiofrequenzstörung, „Criss-Cross“- oder „Herring-Bone“-Artefakt, Datenfehler (Weishaupt et al. 2006).

#### **2.4.4 Vorteile und Kontraindikationen**

Der entscheidende Vorteil der Magnetresonanztomografie gegenüber anderen vergleichbaren radiologischen Untersuchungsverfahren, v.a. gegenüber der Computertomografie, ist sicherlich, dass sie ohne Röntgenstrahlung, also ohne ionisierende Strahlung, hochwertige Bilder erzeugen kann. Es muss allerdings bedacht werden, dass auch das stationäre Magnetfeld des MR-Tomografen sehr stark ist und dadurch für Patient und Personal eine potentielle Gefährdung darstellt. Vor allem ferromagnetische Gegenstände, die in die Nähe des Tomografen gebracht werden, können sich zu gefährlichen Geschossen entwickeln („Missile Effekt“) und bis hin zu tödlichen Unfällen führen.

Anamnestisch erfragt werden muss daher vor jeder MRT-Untersuchung immer das Vorhandensein von Metall im Körper des Patienten. Die heute verwendeten biomedizinischen Implantate sind bis zu einer Feldstärke von 4 T überwiegend als unbedenklich zu erachten. Ausnahmen dabei bilden zerebrale Gefäßclips, künstliche Herzklappen und Gefäßstents, bei denen im Einzelfall die MR-Tauglichkeit abgeklärt werden sollte. Allgemein als nicht MR-tauglich angesehen werden Patienten mit Herzschrittmachern, da Herzrhythmusstörungen, Verbrennungen und Gefäßthrombosierungen aufgrund des Magnetfeldes und resultierender Erwärmung auftreten können. Weitere Kontraindikationen sind aktuell interne Defibrillatoren, linksventrikuläre Pumpen, Neurostimulatoren und Cochlea-Implantate. Hierbei können sich allerdings in naher Zukunft technische Änderungen ergeben, die die Kontraindikationen relativieren könnten. Besondere Vorsicht sollte auch bei Patienten mit Tätowierungen, „Piercings“, Metallsplintern, Schussprojektilen oder Zahnprothesen

gelten, da neben möglichen Artefakten in der Bildgebung auch Verletzungsgefahr durch Dislokation oder Verbrennung besteht.

Da nach wie vor eine mögliche Schädigung des Fötus im ersten Trimenon nicht sicher ausgeschlossen werden kann, sollten schwangere Patientinnen erst nach Abschluss des ersten Trimesters einer MRT-Untersuchung zugeführt werden. Dem Problem der Klaustrophobie im MRT kann heute mit geduldiger Aufklärung des Patienten, im Gerät montierten Spiegeln, Prismenbrillen oder auch mittels einer leichten Sedierung gut begegnet werden, sodass Klaustrophobie nur noch in seltenen Fällen eine Kontraindikation zur Untersuchung im Magnetresonanztomografen darstellen sollte.

### 3 Fragestellung und Ziele

Wie bereits ausgeführt liegen in Deutschland die Altersgrenzen beim Jugendstrafrecht bzw. allgemeinem Strafrecht bei 18 bzw. 21 Jahren. Daraus wird ersichtlich, dass die Methode der Altersdiagnostik mit Hilfe einer Röntgenaufnahme der Hand in diesem Altersspektrum allein keine ausreichende Aussagekraft besitzt, wodurch der Altersdiagnostik anhand der Beurteilung der medialen Claviculaenden eine tragende Rolle zuteilwird.

Wie Kreitner et al. gezeigt haben, kann mit dieser Methode eine verifizierte Aussage hinsichtlich des Alters von Jugendlichen und jungen Erwachsenen am Ende der zweiten bzw. am Anfang der dritten Lebensdekade getroffen werden, womit der überwiegende Teil des Altersspektrums bei forensischen Fragestellungen des Jugend- oder allgemeinen Strafrechts abgedeckt ist.

Da die höchste Aussagekraft dieser Untersuchungsmethode aktuell allerdings nicht mit konventionellen Röntgenaufnahmen, sondern mit Computertomografie-Aufnahmen erreicht wird, entsteht so das Problem der damit verbundenen Strahlenbelastung, gerade weil die zu untersuchenden Personen noch sehr jung sind.

Mit der vorliegenden Arbeit soll nun folgenden Fragen nachgegangen werden: Ist es möglich, die Untersuchung der medialen Claviculaenden statt mit Computertomografie mit Magnetresonanztomografie durchzuführen? Kann man mit MRT in gleicher Weise wie mit CT die Ossifikationskerne der Sternoklavikulargelenke sehen? Erfüllt die Qualität der MRT-Aufnahmen ebenso wie die der CT-Aufnahmen die Kriterien, um eine qualifizierte Aussage über das Alter der untersuchten Person zu treffen? Welche Sequenzen im MRT sind gut geeignet und welche ausreichend für die Detektion von Ossifikationskernen?

Ziel ist es also, eine Methode zu entwickeln, mit deren Hilfe es in Zukunft möglich wird, eine radiologische Altersdiagnostik anhand der Sternoklavikulargelenke ohne die Strahlenbelastung der Computertomografie durchzuführen.

## 4 Material und Methoden

### 4.1 Patientenkollektiv

Aus dem Zeitraum November 2001 bis März 2009 wurden 339 MRT-Untersuchungen des Thorax und der Halsweichteile aus dem Speicher des PACS (Picture Archiving and Communication Systems) des Institutes für Diagnostische und Interventionelle Radiologie des Universitätsklinikums Jena ausgewertet. Darüber hinaus wurden verschiedene Orientierungen und Sequenzen bewertet, sodass insgesamt 899 Aufnahmen der medialen Claviculaenden in die Arbeit einbezogen wurden (siehe Abb. 8).

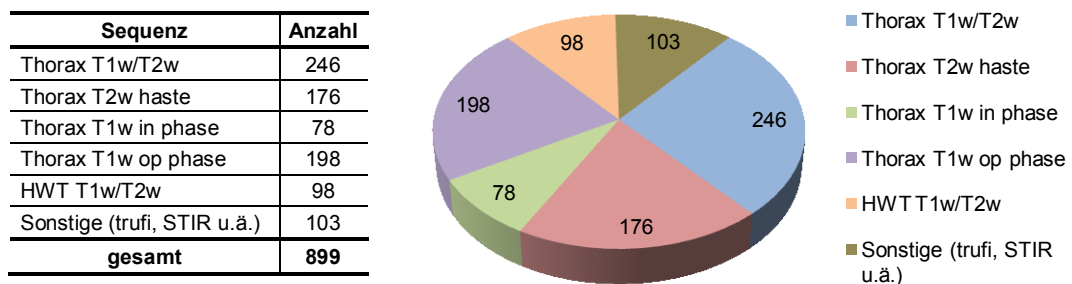


Abb. 8 Sequenzen, Wichtungen und Anzahl der ausgewerteten Aufnahmen.

Neben den MRT-Aufnahmen wurden zusätzlich 86 CT-Untersuchungen beurteilt, sofern sie bei einem Patienten zeitgleich zum MRT vorlagen, um einen direkten Vergleich zwischen MRT und CT herstellen zu können.

Die Schichtdicken lagen in 452 MRT-Untersuchungen (50,3%) bei 5-7mm, in 164 Untersuchungen (18,2%) bei 4mm, in 123 Untersuchungen (13,7%) bei 4-6mm, in 110 Untersuchungen (12,2%) bei 5mm und in 50 Untersuchungen (5,6%) wurden variable Schichtdicken verwendet. Die variierenden Schichtdicken ergeben sich darüber hinaus

aus einem patientenbezogenen Distanzfaktor, der für die verschiedenen klinischen Fragestellungen jeweils individuell gewählt wird.

Das untersuchte Patientenkollektiv war zwischen 10 und 30 Jahren alt und teilte sich in 186 männliche (54,9%) und 153 weibliche (45,1%) Patienten. Die Indikation für die MRT-Untersuchung war in 257 Fällen (75,8%) eine Tumorerkrankung, in 19 Fällen (5,6%) eine neurologische Erkrankung, in 14 Fällen (4,1%) ein Trauma und in 11 Fällen (3,2%) ein Entzündungsgeschehen. In 38 Fällen (11,2%) lagen verschiedene Gründe für die Untersuchung vor, so z.B. Autoimmunerkrankungen, genetische Erkrankungen oder psychische Leiden (siehe Abb. 9). Patienten mit Erkrankungen, die mit Ossifikationsstörungen einhergehen, wurden aus dem Kollektiv ausgeschlossen.

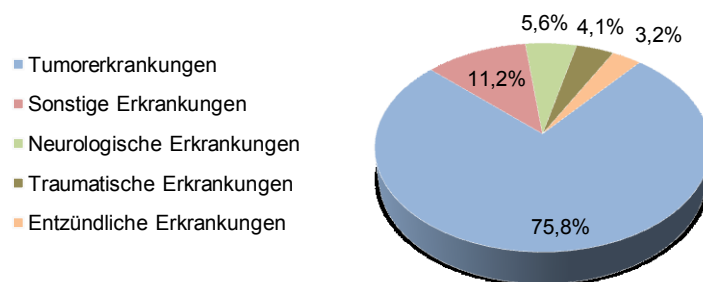


Abb. 9 Prozentuale Anteile der Diagnosen der untersuchten Patienten.

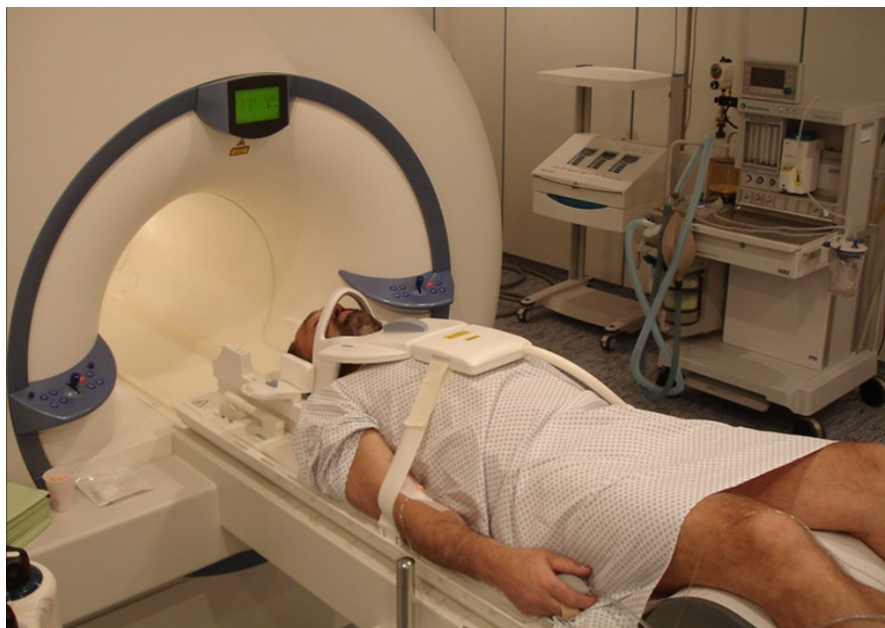
## 4.2 Durchführung der Untersuchung

Die MRT-Aufnahmen erfolgten an den Geräten MAGNETOM Sonata/Symphony Maestro Class bzw. MAGNETOM Vision der Firma Siemens mit jeweils 1,5 Tesla, die CT-Aufnahmen an den Geräten LightSpeed (4-/16-Zeiler) bzw. LightSpeed VCT (64-Zeiler) der Firma General Electric.

Sowohl für die Aufnahmen des Thorax als auch der Halsweichteile werden die Patienten auf dem Rücken liegend und mit dem Kopf in Richtung der Magnetspulen (head first supine) auf dem Untersuchungstisch gelagert. Um ein besseres Signal-zu-

Rausch-Verhältnis zu erhalten (siehe Kapitel 2.4.3.4) werden spezielle Empfangsspulen (Oberflächenspulen) um die zu untersuchende Körperregion angebracht. Anschließend wird der Patient mit der Untersuchungsliege so innerhalb der Magnetspulen positioniert, dass sich der Thorax bzw. Hals des Patienten in der Gerätemitte und damit an dem Ort befindet, an dem das Magnetfeld am stärksten und gleichmäßigsten ausgeprägt ist (Rummeny et al. 2006).

Abb. 10 zeigt die Lagerung eines Patienten zur MRT-Aufnahme der Halsweichteile mit der entsprechenden Oberflächenspule vor Untersuchungsbeginn.



*Abb. 10 Patientenlagerung zur Aufnahme von MRT-Halsweichteilen.*

### **4.3 Datenerhebung und Auswertungskriterien**

Anhand einer Selektionsmaske wurden aus dem Speicher des PACS Listen erstellt, die alle MRT-Aufnahmen des Thorax und des Halses im Zeitraum von Januar 1998 bis März 2009 enthielten. Aus diesem Kollektiv wurden alle Patienten, die zum Untersuchungszeitpunkt zwischen 10 und 30 Jahre alt waren, gesondert in Listen

übertragen. Nach erstmaliger Sichtung dieser Daten mussten weiterhin Aufnahmen aus dem Kollektiv gestrichen werden, da sie entweder unter falscher Untersuchungsbezeichnung bzw. -beschreibung im PACS registriert waren und so nicht den gewünschten Modalitäten entsprachen, oder die technischen Bedingungen bei der Erstellung der Aufnahme unüblich gewählt worden waren, sodass die medialen Claviculaenden nicht im erforderlichen Maß abgebildet waren. Das entstandene Kollektiv konnte anschließend über einen Zeitraum von September 2008 bis März 2009 ausgewertet werden.

Die Auswertung der MRT-Aufnahmen erfolgte nach folgenden Kriterien:

- Art der Aufnahme: Thorax / Halsweichteile, coronar / transversal

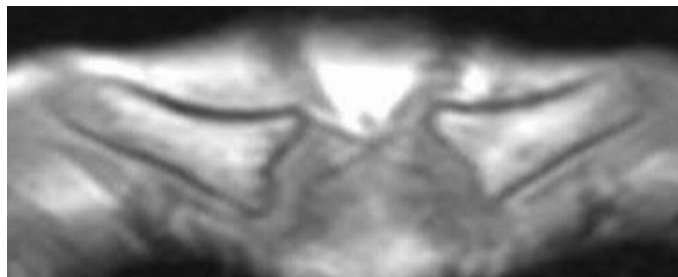
Es wurden nahezu ausschließlich native Aufnahmen ohne Kontrastmittel ausgewertet, da in der Anwendung zur forensischen Altersdiagnostik Kontrastmittel aufgrund der vorhandenen Risiken und Nebenwirkungen für den Patienten nicht angewendet wird. Um einen möglichen Gewinn in der Auswertung durch Aufnahmen mit Kontrastmittel auszuschließen, wurden exemplarisch vier Untersuchungen nach Gabe von Kontrastmittel in die Bewertung einbezogen. Lag beim Patienten zeitgleich zum MRT auch eine CT-Aufnahme der Sternoklavikulargelenksregion vor, so wurde diese in vergleichender Hinsicht ebenso ausgewertet.

- Wichtung der Aufnahme: T1w, T2w
- Schichtdicke der Aufnahme: 4mm, 4-6mm, 5mm, 5-7mm, individuelle Schichtdicke
- Repetitionszeit TR, Echozeit TE
- Beurteilbarkeit der Aufnahme: *folgende Abbildungen erläutern die Beurteilbarkeit*





*Abb. 11 Sehr gute Beurteilbarkeit: hoher Kontrast, hohe Auflösung. Begrenzungen und Strukturen sind klar erkennbar.*



*Abb. 12 Gute Beurteilbarkeit: Kontrast und Auflösung vermindert. Begrenzungen und Strukturen ausreichend erkennbar.*



*Abb. 13 Mangelhafte Beurteilbarkeit: Kontrast gering, Auflösung deutlich gemindert. Begrenzungen und Strukturen können erahnt werden.*



*Abb. 14 Nicht beurteilbar: Kaum Kontrast, Auflösung sehr niedrig. Begrenzungen und Strukturen können nicht beurteilt werden.*

- Ergebnis: Einteilung der Ossifikation in Stadium I bis IV in Analogie zur Literatur



Abb. 15      Stadium I  
*Kein Ossifikationskern ist erkennbar.*

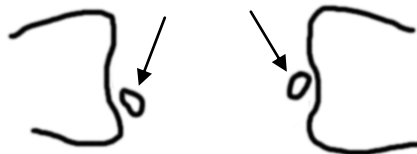


Abb. 16      Stadium II  
*Isolierte Ossifikationskerne sind erkennbar (Pfeile). Die Achsen der Kerne sind nicht parallel zu den Grenzlamellen der Claviculae.*

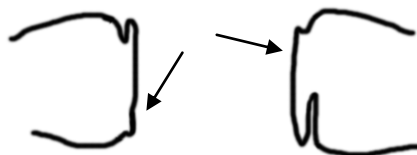


Abb. 17      Stadium III  
*Die Ossifikationskerne sind partiell mit der Clavicula verschmolzen (Pfeile). Die Achsen der Kerne sind parallel zu den Grenzlamellen der Claviculae.*



Abb. 18      Stadium IV  
*Die Ossifikationskerne sind vollständig mit den Claviculae fusioniert.*

## 4.4 Statistische Methoden

Im Folgenden sollen die im Ergebnisteil angewandten statistischen Testverfahren mit ihrer Anwendung kurz genannt und erläutert werden.

Zunächst erfolgte für jedes Stadium eine deskriptive Auswertung mit Angabe von Häufigkeiten, Mittelwert, 95%-Konfidenzintervall, Median und Standardabweichung, sowie eine Berechnung der 2,5- und 97,5-Perzentilen mit Angabe des 95%-Referenzbereiches.

Für die Verteilung der Altersstufen auf die vier Stadien der Claviculareifung wurde darüber hinaus ein einfaktorieller ANOVA-Test einschließlich eines Post-Hoc-Tests nach Bonferroni mit einem Signifikanzniveau von 0,05 durchgeführt, also ein Mittelwertvergleich von mehr als zwei unabhängigen Stichproben. Damit sollte untersucht werden, ob zwischen den vier Stadien ein signifikanter Altersunterschied nachgewiesen werden kann.

Mit Hilfe eines T-Tests (Mittelwertvergleich) bei unabhängigen Stichproben wurde überprüft, ob im Gesamtkollektiv bzw. innerhalb der einzelnen Stadien ein signifikanter Altersunterschied zwischen weiblichen und männlichen Geschlechtern besteht.

Desweiteren wurde untersucht, welche MRT-Sequenzen am besten geeignet sind zur Darstellung der medialen Claviculaepiphyse. Dazu wurden Thorax- mit Halsweichteil-Darstellungen, coronare Schnitte mit transversalen Schnitten, T1w- mit T2w-Aufnahmen, reine T1w-/T2w-Sequenzen mit modifizierten Sequenzen und modifizierte Sequenzen untereinander nach ihrer Beurteilbarkeit verglichen. Statistisches Verfahren hierzu war die Erstellung von Kreuztabellen mit anschließendem Chi-Quadrat-Test (Überprüfung der Unabhängigkeit der Variablen), um die Signifikanz der errechneten Unterschiede zu prüfen (Bühl 2008).

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Stadieneinteilung in Korrelation mit dem Alter der Patienten

Wie in Kapitel 4.3 erläutert, wurde jede MRT-Aufnahme anhand der Ausreifungsstufe der medialen Claviculaepiphyse in eines von vier Stadien eingeordnet. Diese Zuordnung in Korrelation mit dem Alter der Patienten zeigen Tab. 3 und Abb. 19.

#### *Altersverteilung der Entwicklungsstadien der medialen Claviculaepiphyse*

#### *Beurteilung mittels MRT und CT*

Alter (Jahre)	Stadium 1		Stadium 2		Stadium 3		Stadium 4		Total	
	MRT	CT	MRT	CT	MRT	CT	MRT	CT	MRT	CT
	n (%)	n (%)	n (%)	n (%)	n (%)	n (%)	n (%)	n (%)		
10	2 100%	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	2	0
11	7 100%	3 100%	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	7	3
12	8 100%	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	8	0
13	7 78%	3 100%	2 22%	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	9	3
14	14 74%	5 83%	5 26%	1 17%	0 -	0 -	0 -	0 -	19	6
15	14 45%	2 29%	16 52%	5 71%	1 3%	0 -	0 -	0 -	31	7
16	6 15%	0 -	29 73%	7 100%	5 13%	0 -	0 -	0 -	40	7
17	1 3%	0 -	18 49%	8 62%	18 49%	5 38%	0 -	0 -	37	13
18	0 -	0 -	13 31%	3 27%	29 69%	8 73%	0 -	0 -	42	11
19	0 -	0 -	5 18%	1 10%	22 79%	9 90%	1 4%	0 -	28	10
20	0 -	0 -	0 -	0 -	14 93%	3 75%	1 7%	1 25%	15	4
21	0 -	0 -	0 -	0 -	9 82%	2 100%	2 18%	0 -	11	2
22	0 -	0 -	0 -	0 -	5 28%	0 -	13 72%	2 100%	18	2
23	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	6 100%	0 -	6	0
24	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	6 100%	2 100%	6	2
25	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	21 100%	2 100%	21	2
26	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	11 100%	4 100%	11	4
27	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	11 100%	5 100%	11	5
28	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	6 100%	2 100%	6	2
29	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	3 100%	1 100%	3	1
30	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	8 100%	2 100%	8	2
Total	59 17%	13 15%	88 26%	25 29%	103 30%	27 31%	89 26%	21 24%	339	86

Tab. 3

Zur Verdeutlichung der analogen Auswertbarkeit von CT- und MRT-Aufnahmen sind in Tab. 3 neben den Daten der MRT-Untersuchungen auch die Zahlen der CT-Untersuchungen (kursiv) dargestellt.

Die statistische Auswertung der MRT-Untersuchungen ergab Folgendes:

Stadium 1 konnten insgesamt 59 Patienten mit einem mittleren Alter von 13,61 Jahren, einem 95%-Konfidenzintervall von 13,16 bis 14,06 Jahren und einer Standardabweichung von 1,722 Jahren zugeordnet werden. Dabei ergab sich ein Median von 14,00 Jahren und ein 95%-Referenzbereich von 10,00 bis 16,50 Jahren.

Im Stadium 2 befanden sich 88 Patienten mit einem mittleren Alter von 16,31 Jahren, einem 95%-Konfidenzintervall von 16,02 bis 16,59 Jahren und einer Standardabweichung von 1,359 Jahren. Der zugehörige Median lag bei 16,00 Jahren und der 95%-Referenzbereich ging von 13,23 bis 19,00 Jahren.

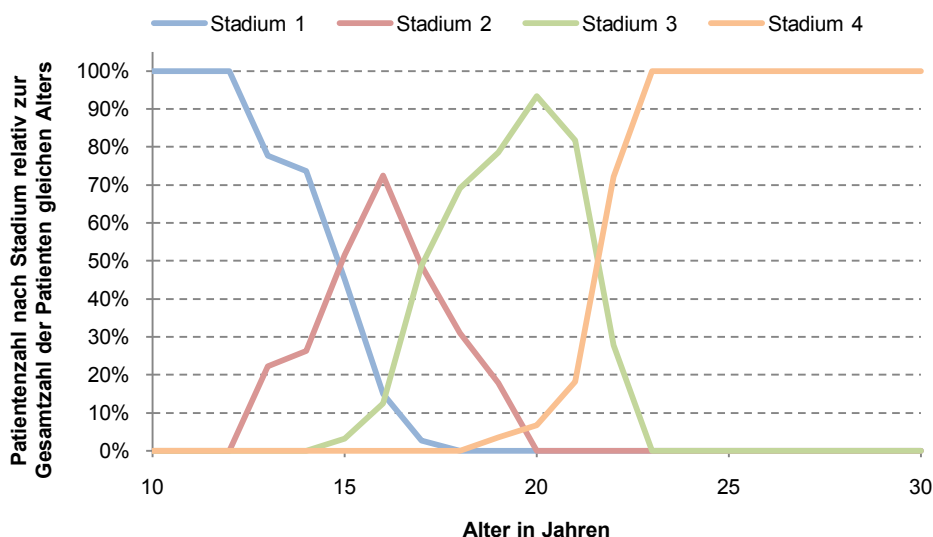


Abb. 19 Grafische Darstellung der Altersverteilung der Clavicula-Entwicklungsstadien.

Eine Zuordnung zu Stadium 3 erfolgte bei 103 Patienten mit einem mittleren Alter von 18,64 Jahren, einem 95%-Konfidenzintervall von 18,34 bis 18,94 Jahren und einer

Standardabweichung von 1,546 Jahren. Es konnte ein Median bei 18,00 Jahren und ein 95%-Referenzbereich von 16,00 bis 22,00 Jahren errechnet werden.

Dem Stadium 4 wurden insgesamt 89 Patienten mit einem mittleren Alter von 25,30 Jahren, einem 95%-Konfidenzintervall von 24,76 bis 25,85 Jahren und einer Standardabweichung von 2,587 Jahren zugeteilt. Dabei ergab sich ein Median bei 25,00 Jahren und ein 95%-Referenzbereich von 20,25 bis 30,00 Jahren (Vgl. Tab. 4).

Ein isoliertes Ossifikationszentrum der medialen Claviculaepiphyse tritt also im Mittel erstmals mit 16 Jahren auf, die partielle Verschmelzung des Knochenkerns erfolgt mit 95%iger Wahrscheinlichkeit bis zum Alter von 22 Jahren. Eine vollständige Fusion und damit Ossifizierung tritt mit 95%iger Wahrscheinlichkeit erstmals mit 21 Jahren und bei allen Patienten ab 23 Jahren auf.

**Statistische Auswertung der Entwicklungsstadien im MRT bezüglich des Patientenalters**

	Stadium 1	Stadium 2	Stadium 3	Stadium 4
Anzahl Patienten	59	88	103	89
mittleres Alter	13,61	16,31	18,64	25,30
Untergrenze 95%-Konfidenzintervall	13,16	16,02	18,34	24,76
Obergrenze 95%-Konfidenzintervall	14,06	16,59	18,94	25,85
Standardabweichung	1,72	1,36	1,55	2,59
Median	14	16	18	25
Untergrenze 95%-Referenzbereich	10,00	13,23	16,00	20,25
Obergrenze 95%-Referenzbereich	16,50	19,00	22,00	30,00

Tab. 4

Vergleicht man nun die Altersmittelwerte der vier Stadien mit Hilfe eines einfaktoriellen Anova-Tests miteinander (siehe Tab. 5) und prüft das Ergebnis anschließend mit einem Post-Hoc-Test nach Bonferroni (siehe Tab. 6), kann gezeigt werden, dass zwischen allen vier Stadien ein signifikanter Altersunterschied besteht.

**ANOVA-Test zum Vergleich der Altersmittelwerte der vier Stadien**

	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
<b>Zwischen den Gruppen</b>	5898,898	3	1966,299	565,287	0,000
<b>Innerhalb der Gruppen</b>	1165,268	335	3,478		
<b>Gesamt</b>	7064,165	338			

df=Anzahl der Freiheitsgrade, F=Prüfwert des Fisher-Tests

Tab. 5

**Mehrfachvergleiche - Post Hoc Tests nach Bonferroni bezüglich Alter und Stadium**

(I) Stadium	(J) Stadium	Mittlere Differenz (I- J)	Standardfehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall	
					Untergrenze	Obergrenze
1	2	-2,697 <sup>*</sup>	0,314	0,000	-3,53	-1,86
	3	-5,031 <sup>*</sup>	0,305	0,000	-5,84	-4,22
	4	-11,693 <sup>*</sup>	0,313	0,000	-12,52	-10,86
2	1	2,697 <sup>*</sup>	0,314	0,000	1,86	3,53
	3	-2,334 <sup>*</sup>	0,271	0,000	-3,05	-1,62
	4	-8,997 <sup>*</sup>	0,28	0,000	-9,74	-8,25
3	1	5,031 <sup>*</sup>	0,305	0,000	4,22	5,84
	2	2,334 <sup>*</sup>	0,271	0,000	1,62	3,05
	4	-6,663 <sup>*</sup>	0,27	0,000	-7,38	-5,95
4	1	11,693 <sup>*</sup>	0,313	0,000	10,86	12,52
	2	8,997 <sup>*</sup>	0,28	0,000	8,25	9,74
	3	6,663 <sup>*</sup>	0,27	0,000	5,95	7,38

\*. Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0.05 signifikant.

Tab. 6

Zwischen Stadium 1 und 2 besteht ein mittlerer Altersunterschied von 2,697 Jahren, zwischen Stadium 2 und 3 von 2,334 Jahren und zwischen Stadium 3 und 4 von 6,663 Jahren. In allen Fällen ist das Signifikanzniveau 0,000, also kleiner 0,05. Das bedeutet, dass die Altersdifferenz zwischen den Stadien signifikant, also keine durch Zufall erklärbare Beobachtung ist.

Daraus wird ersichtlich, dass die Auswertung von MRT-Aufnahmen der medialen Claviculaepiphyse eine geeignete Methode darstellt, um auf das Alter der untersuchten Person schließen zu können. Begutachtet man beispielsweise eine MRT-Aufnahme, auf der eine vollständig ossifizierte mediale Claviculaepiphyse zu sehen ist, also Stadium 4, kann die Aussage getroffen werden, dass die untersuchte Person mit 95%iger Wahrscheinlichkeit mindestens 21 Jahre alt ist.

## 5.2 Altersunterschiede in Abhängigkeit vom Geschlecht

Von den insgesamt 339 ausgewerteten Patienten waren 186 (54,9%) männlich und 153 (45,1%) weiblich. Mit Hilfe eines T-Tests für unabhängige Stichproben soll nun geprüft werden, ob sowohl im gesamten Patientenkollektiv als auch innerhalb der einzelnen Stadien relevante Unterschiede im Altersmittelwert bestehen (Vgl. Tab. 7).

*Statistische Auswertung der Altersunterschiede der männlichen und weiblichen Patienten*

	Gesamtkollektiv	Stadium 1	Stadium 2	Stadium 3	Stadium 4
Anzahl Patienten männlich	186	35	51	52	48
Anzahl Patienten weiblich	153	24	37	51	41
Mittelwert Alter männlich	18,86	13,63	16,47	18,71	25,38
Mittelwert Alter weiblich	18,97	13,58	16,08	18,57	25,22
Standardabweichung Alter männlich	4,56	1,59	1,35	1,49	2,43
Standardabweichung Alter weiblich	4,60	1,93	1,36	1,62	2,79
Signifikanz (2-seitig)	0,830/ 0,831	0,922/ 0,925	0,186/ 0,187	0,641/ 0,642	0,779/ 0,782

Tab. 7

Im gesamten Patientenkollektiv waren die männlichen Patienten im Mittel 18,86 Jahre alt mit einer Standardabweichung von 4,56 Jahren, die weiblichen Patienten im Mittel 18,97 Jahre alt mit einer Standardabweichung von 4,60 Jahren.

Im Stadium 1 kann für die 35 männlichen Patienten ein mittleres Alter von 13,63 Jahren mit einer Standardabweichung von 1,59 Jahren, für die 24 weiblichen Patienten ein mittleres Alter von 13,58 Jahren mit einer Standardabweichung von 1,93 Jahren errechnet werden.

Im Stadium 2 hatten die 51 männlichen Patienten im Mittel ein Alter von 16,47 Jahren mit einer Standardabweichung von 1,35 Jahren, die 37 weiblichen Patienten im Mittel ein Alter von 16,08 Jahren mit einer Standardabweichung von 1,36 Jahren.

Im Stadium 3 berechnet sich für die 52 männlichen Patienten ein mittleres Alter von 18,71 Jahren mit einer Standardabweichung von 1,49 Jahren, für die 51 weiblichen



Patienten ein mittleres Alter von 18,57 Jahren mit einer Standardabweichung von 1,62 Jahren.

Im Stadium 4 waren die 48 männlichen Patienten im Mittel 25,38 Jahre alt mit einer Standardabweichung von 2,43 Jahren, die 41 weiblichen Patienten waren im Mittel 25,22 Jahre alt mit einer Standardabweichung von 2,79 Jahren (siehe Abb. 20).

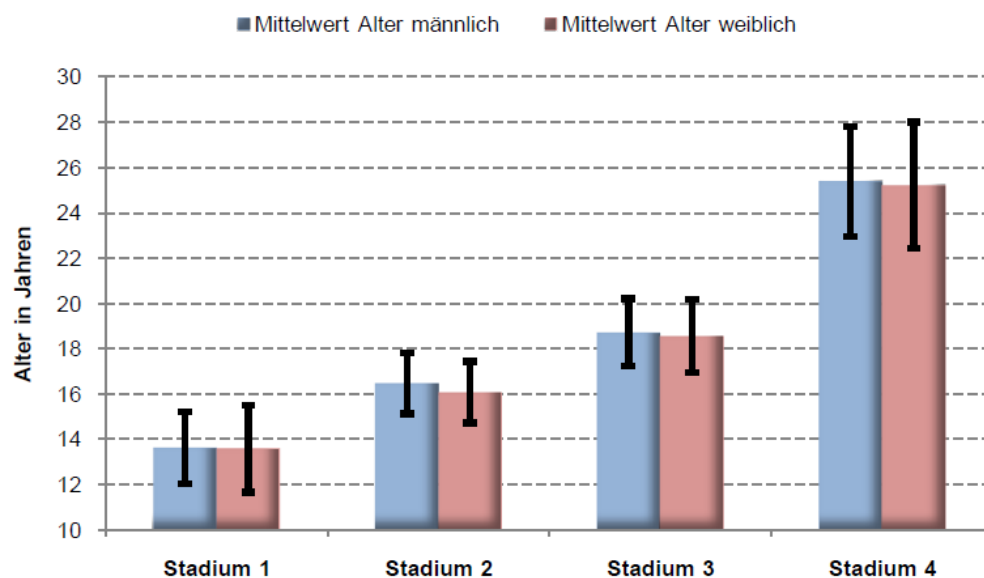


Abb. 20 Grafische Darstellung der Mittelwerte der Altersverteilung bei männlichen und weiblichen Patienten.

Das zugehörige Signifikanzniveau ist sowohl im Gesamtkollektiv als auch innerhalb der einzelnen Stadien deutlich größer als 0,05. Daraus wird ersichtlich, dass weder im gesamten Patientenkollektiv noch innerhalb der Stadien ein signifikanter Altersunterschied zwischen weiblichen und männlichen Patienten besteht, das heißt es kann kein geschlechtsspezifischer Unterschied bezüglich der Altersverteilung in den vier Stadien nachgewiesen werden, die altersabhängige Reifung der medialen Claviculaepiphyse kann demnach bei weiblichen und männlichen Patienten analog beurteilt werden.

### 5.3 Beurteilungsunterschiede in Abhängigkeit von den Aufnahmekriterien

Eine weitere Zielstellung dieser Arbeit war, die Bedingungen herauszuarbeiten, unter denen das Sternoclaviculargelenk am besten im MRT dargestellt werden kann. Hierzu wurden vergleichend verschiedene Einstellungen, Orientierungen, Wichtungen und Sequenzen im MRT untersucht.

Die Beurteilbarkeit insgesamt war dabei in 345 Fällen (38,4%) sehr gut, in 480 Fällen (53,4%) gut und in 55 Fällen (6,1%) mangelhaft. 19 MRT-Aufnahmen (2,1%) eigneten sich hinsichtlich der Durchführung nicht für die vorliegende Fragestellung.

#### 5.3.1 Vergleich von Thorax- und Halsweichteil-Untersuchungen

Insgesamt konnten 246 Thorax-MRT-Untersuchungen und 98 Halsweichteil-Darstellungen ausgewertet werden. Davon erhielten 102 Thorax-Untersuchungen (41,5%) und 69 Halsweichteil-Untersuchungen (70,4%) eine sehr gute Beurteilbarkeit. Nachstehende Kreuztabelle (Tab. 8) mit sich anschließendem Qui-Quadrat-Test (Tab. 9) zeigt, dass der Unterschied der Beurteilbarkeit der medialen Clavicula in Thorax- und Halsweichteil-Aufnahmen signifikant ist. Dies bestätigt, dass das Sternoclaviculargelenk in Halsweichteil-Untersuchungen besser beurteilt werden kann als in Thorax-Untersuchungen.

**Vergleich der Beurteilbarkeit von Thorax- und HWT-MRT-Aufnahmen**

Aufnahme	Beurteilbarkeit: sehr gut		gesamt
	nein	ja	
Thorax	144 (58,5%)	102 (41,5%)	246 (100%)
Halsweichteile	29 (29,6%)	69 (70,4%)	98 (100%)
Gesamt	173 (50,3%)	171 (49,7%)	344 (100%)

Tab. 8

**Signifikanzprüfung zum Vergleich der Beurteilbarkeit von Thorax- und Halsweichteilaufnahmen**

	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (1-seitig)
Chi-Quadrat nach Pearson	23,486 <sup>a</sup>	1	0,000		
Kontinuitätskorrektur <sup>b</sup>	22,343	1	0,000		
Likelihood-Quotient	24,007	1	0,000		
Exakter Test nach Fisher				0,000	0,000
Zusammenhang linear-mit-linear	23,418	1	0,000		
Anzahl der gültigen Fälle	344				

a. 0 Zellen (,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5. Die minimale erwartete Häufigkeit ist 51,00.

b. Wird nur für eine 2x2-Tabelle berechnet

df=Anzahl der Freiheitsgrade

Tab. 9

### 5.3.2 Vergleich von coronaren und transversalen Aufnahmen

Innerhalb der MRT-Untersuchungen des Thorax wurden jeweils 123 (50%) coronare und transversale Schnittbilder analysiert. Bei den coronaren Bildern konnte 71 mal (57,7%) das Urteil „sehr gut beurteilbar“ vergeben werden, bei den transversalen Bildern dagegen lediglich 31 mal (25,2%) (Vgl. Tab. 10). Der Signifikanztest in Form des Qui-Quadrat-Tests ergab Werte von 0,000, das heißt mit coronaren Schnittebenen kann die mediale Claviculaepiphyse signifikant besser beurteilt werden als mit transversalen Schnittebenen (Vgl. Tab. 11).

**Vergleich der Beurteilbarkeit von coronaren und transversalen Aufnahmen**

Aufnahme	Beurteilbarkeit: sehr gut		gesamt
	nein	ja	
coronar	52 (42,3%)	71 (57,7%)	123 (100%)
transversal	92 (74,8%)	31 (25,2%)	123 (100%)
gesamt	144 (58,5%)	102 (41,5%)	246 (100%)

Tab. 10

**Signifikanzprüfung zum Vergleich der Beurteilbarkeit von coronaren und transversalen Aufnahmen**

	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (1-seitig)
Chi-Quadrat nach Pearson	26,797 <sup>a</sup>	1	0,000		
Kontinuitätskorrektur <sup>b</sup>	25,474	1	0,000		
Likelihood-Quotient	27,374	1	0,000		
Exakter Test nach Fisher				0,000	0,000
Zusammenhang linear-mit-linear	26,688	1	0,000		
Anzahl der gültigen Fälle	246				

a. 0 Zellen (,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5. Die minimale erwartete Häufigkeit ist 51,00.

b. Wird nur für eine 2x2-Tabelle berechnet

df=Anzahl der Freiheitsgrade

Tab. 11

### 5.3.3 Vergleich von T1-Wichtung und T2-Wichtung

Zunächst wurde untersucht, ob innerhalb aller ausgewerteten MRT-Aufnahmen ein signifikanter Unterschied in der Beurteilbarkeit zwischen T1w- und T2w-Bildern besteht. Insgesamt wurden 492 T1w- (54,7%) und 407 T2w- (45,3%) Aufnahmen untersucht, davon waren 187 T1w-Bilder (38,0%) und 158 T2w-Bilder (38,8%) hinsichtlich dem sternalen Claviculaende sehr gut zu beurteilen (siehe Tab. 12). Im anschließenden Qui-Quadrat-Test konnte die Hypothese, dass im Gesamtkollektiv kein Unterschied in der Beurteilbarkeit zwischen T1w- und T2w-Bildern diesbezüglich besteht, anhand der hohen p-Werte bestätigt werden (siehe Tab. 13).

**Vergleich der Beurteilbarkeit von T1w und T2w**

Aufnahme	Beurteilbarkeit: sehr gut		Gesamt
	nein	ja	
T1w	305 (62,0%)	187 (38,0%)	492 (100%)
T2w	249 (61,2%)	158 (38,8%)	407 (100%)
gesamt	554 (61,6%)	345 (38,4%)	899 (100%)

Tab. 12

**Signifikanzprüfung zum Vergleich der Beurteilbarkeit von T1w und T2w**

	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (1-seitig)
Chi-Quadrat nach Pearson	0,062 <sup>a</sup>	1	0,803		
Kontinuitätskorrektur <sup>b</sup>	0,033	1	0,857		
Likelihood-Quotient	0,062	1	0,803		
Exakter Test nach Fisher				0,836	0,428
Anzahl der gültigen Fälle	899				

a. 0 Zellen (,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5. Die minimale erwartete Häufigkeit ist 156,19.

b. Wird nur für eine 2x2-Tabelle berechnet

df=Anzahl der Freiheitsgrade

Tab. 13

Nachdem also im Gesamtkollektiv kein signifikanter Unterschied zwischen T1w- und T2w-Aufnahmen festgestellt werden konnte, wurde weiter untersucht, ob innerhalb der Halsweichteil-Aufnahmen, der coronaren oder der transversalen Thorax-Schichten ein Unterschied errechnet werden kann.

**Halsweichteil-Aufnahmen**

Von den insgesamt 98 ausgewerteten Halsweichteil-MRT-Aufnahmen hatten 32 (66,7%) T1w und 37 (74,0%) T2w eine sehr gute Beurteilbarkeit (siehe Tab. 14). Anhand des Qui-Quadrat-Tests konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden (siehe Tab. 15).

**Vergleich der Beurteilbarkeit von T1w und T2w innerhalb der HWT-Aufnahmen**

Aufnahme	Beurteilbarkeit: sehr gut		Gesamt
	nein	ja	
T1w in HWT	16 (33,3%)	32 (66,7%)	48 (100%)
T2w in HWT	13 (26,0%)	37 (74,0%)	50 (100%)
gesamt	29 (29,6%)	69 (70,4%)	98 (100%)

Tab. 14

**Signifikanzprüfung zum Vergleich der Beurteilbarkeit von T1w und T2w innerhalb der HWT-Aufnahmen**

	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (1-seitig)
Chi-Quadrat nach Pearson	0,632 <sup>a</sup>	1	0,427		
Kontinuitätskorrektur <sup>b</sup>	0,329	1	0,566		
Likelihood-Quotient	0,633	1	0,426		
Exakter Test nach Fisher				0,509	0,283
Anzahl der gültigen Fälle	98				

a. 0 Zellen (,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5. Die minimale erwartete Häufigkeit ist 14,20.

b. Wird nur für eine 2x2-Tabelle berechnet

df=Anzahl der Freiheitsgrade

Tab. 15

Coronare Thorax-Aufnahmen

Es wurden insgesamt 123 Aufnahmen in coronarer Schnittebene in die Auswertung einbezogen, davon waren 39 (52,7%) T1w-Bilder und 32 (65,3%) T2w-Bilder sehr gut zu beurteilen (siehe Tab. 16). Auch für die coronaren Aufnahmen zeigte sich im Chi-Quadrat-Test kein signifikanter Unterschied zwischen T1w und T2w (siehe Tab. 17).

**Vergleich der Beurteilbarkeit von T1w und T2w innerhalb der coronaren Thorax-Aufnahmen**

Aufnahme	Beurteilbarkeit: sehr gut		Gesamt
	nein	ja	
T1w in coronar	35 (47,3%)	39 (52,7%)	74 (100%)
T2w in coronar	17 (34,7%)	32 (65,3%)	49 (100%)
gesamt	52 (42,3%)	71 (57,7%)	123 (100%)

Tab. 16

**Signifikanzprüfung zum Vergleich der Beurteilbarkeit von T1w und T2w innerhalb der coronaren Thorax-Aufnahmen**

	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (1-seitig)
Chi-Quadrat nach Pearson	1,919 <sup>a</sup>	1	0,166		
Kontinuitätskorrektur <sup>b</sup>	1,437	1	0,231		
Likelihood-Quotient	1,936	1	0,164		
Exakter Test nach Fisher				0,194	0,115
Anzahl der gültigen Fälle	123				

a. 0 Zellen (,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5. Die minimale erwartete Häufigkeit ist 20,72.

b. Wird nur für eine 2x2-Tabelle berechnet

df=Anzahl der Freiheitsgrade

Tab. 17

Transversale Thorax-Aufnahmen

Zuletzt wurden die 123 transversalen Thorax-Aufnahmen auf einen signifikanten Unterschied in der Beurteilbarkeit zwischen T1w und T2w überprüft. Doch auch bei den 16 (31,4%) T1w-Bildern und 15 (20,8%) T2w-Bildern, die sehr gut zu beurteilen waren (siehe Tab. 18), ließ sich im Qui-Quadrat-Test kein signifikanter Unterschied feststellen (siehe Tab. 19).

**Vergleich der Beurteilbarkeit von T1w und T2w innerhalb der transversalen Thorax-Aufnahmen**

Aufnahme	Beurteilbarkeit: sehr gut		Gesamt
	nein	ja	
T1w in transversal	35 (68,6%)	16 (31,4%)	51 (100%)
T2w in transversal	57 (79,2%)	15 (20,8%)	71 (100%)
gesamt	92 (74,8%)	31 (25,2%)	123 (100%)

Tab. 18

**Signifikanzprüfung zum Vergleich der Beurteilbarkeit von T1w und T2w innerhalb der transversalen Thorax-Aufnahmen**

	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (1-seitig)
Chi-Quadrat nach Pearson	1,759 <sup>a</sup>	1	0,185		
Kontinuitätskorrektur <sup>b</sup>	1,244	1	0,265		
Likelihood-Quotient	1,741	1	0,187		
Exakter Test nach Fisher				0,210	0,133
Anzahl der gültigen Fälle	123				

a. 0 Zellen (,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5. Die minimale erwartete Häufigkeit ist 12,85.

b. Wird nur für eine 2x2-Tabelle berechnet

df=Anzahl der Freiheitsgrade

Tab. 19

Zusammenfassend kann also weder im Gesamtkollektiv noch innerhalb der Halsweichteil- oder der coronaren bzw. transversalen Thorax-Schichten ein signifikanter Unterschied in der Beurteilbarkeit in Abhängigkeit von der Wichtung konstatiert werden. Das bedeutet, dass die Gewichtung der MRT-Aufnahme keinen signifikanten Einfluss auf die Beurteilbarkeit des Sternoclavikulargelenks im MRT aufweist.

#### 5.3.4 Vergleich von reinen T1w-/T2w-Sequenzen mit modifizierten Sequenzen

Wie im Kapitel 2.4.3 erläutert, gibt es in der Magnetresonanztomografie neben den reinen T1w- und T2w-Sequenzen auch eine Vielzahl modifizierter Sequenzen. Im Folgenden soll nun geprüft werden, inwiefern die Wahl der Sequenz einen Einfluss auf die Beurteilbarkeit der medialen Claviculaepiphyse hat. Dazu werden die mit reinen T1w/T2w-Sequenzen aufgenommenen Halsweichteil-Bilder mit Thorax-Bildern verglichen, die entweder in der Haste- oder Opposed-Phase-Sequenz erstellt wurden.



### Vergleich von Halsweichteil-Aufnahmen in reiner T1w-/T2w-Sequenz und Thorax-Aufnahmen in Haste-Sequenz

Von den 176 Haste-Thorax-Sequenzen erhielten 55 (31,3%) eine sehr gute Beurteilbarkeit, bei den 98 Halsweichteil-Untersuchungen in reiner T1w/T2w war dies bei 69 (70,4%) der Fall (siehe Tab. Tab. 20). Im Qui-Quadrat-Test erreichte dieser Vergleich einen p-Wert von 0,000, d.h. die Beurteilbarkeit bei den reinen T1w-/T2w-Aufnahmen ist signifikant besser als in den modifizierten Haste-Sequenzen (siehe Tab. 21).

**Vergleich der Beurteilbarkeit von reinen T1w-/T2w-Sequenzen und Haste-Sequenzen**

Aufnahme	Beurteilbarkeit: sehr gut		Gesamt
	nein	ja	
Haste	121 (68,8%)	55 (31,3%)	176 (100%)
T1w/T2w	29 (29,6%)	69 (70,4%)	98 (100%)
gesamt	150 (54,7%)	124 (45,3%)	274 (100%)

Tab. 20

**Signifikanzprüfung zum Vergleich der Beurteilbarkeit von reinen T1w-/T2w-Sequenzen und Haste-Sequenzen**

	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (1-seitig)
Chi-Quadrat nach Pearson	38,960 <sup>a</sup>	1	0,000		
Kontinuitätskorrektur <sup>b</sup>	37,396	1	0,000		
Likelihood-Quotient	39,708	1	0,000		
Exakter Test nach Fisher				0,000	0,000
Zusammenhang linear-mit-linear	38,818	1	0,000		
Anzahl der gültigen Fälle	274				

a. 0 Zellen (,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5. Die minimale erwartete Häufigkeit ist 44,35.

b. Wird nur für eine 2x2-Tabelle berechnet  
df=Anzahl der Freiheitsgrade

Tab. 21

### Vergleich von Halsweichteil-Aufnahmen in reiner T1w-/T2w-Sequenz und Thorax-Aufnahmen in Opposed-Phase-Sequenz

In die Auswertung einbezogen wurden 198 Opposed-Phase-Aufnahmen, von denen 73 (36,9%) eine sehr gute Beurteilbarkeit der sternalen Clavicula aufwiesen. Von den 98 Halsweichteil-Aufnahmen in reiner T1w/T2w traf dies auf 69 (70,4%) zu (siehe Tab. 22). Im Qui-Quadrat-Test zeigte sich, dass dieser Unterschied signifikant ist (siehe Tab. 23), d.h. der Sachverhalt, dass die Beurteilbarkeit mit reinen T1w-/T2w-Bildern besser ist als mit Opposed-Phase-Sequenzen, ist nicht nur durch Zufall erklärbar.

**Vergleich der Beurteilbarkeit von reinen T1w-/T2w-Sequenzen und Opposed-Phase-Sequenzen**

Aufnahme	Beurteilbarkeit: sehr gut		Gesamt
	nein	ja	
Opposed Phase	125 (63,1%)	73 (36,9%)	198 (100%)
T1w/T2w	29 (29,6%)	69 (70,4%)	98 (100%)
gesamt	154 (52,0%)	142 (48,0%)	296 (100%)

Tab. 22

**Signifikanzprüfung zum Vergleich der Beurteilbarkeit von reinen T1w-/T2w-Sequenzen und Opposed-Phase-Sequenzen**

	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (1-seitig)
Chi-Quadrat nach Pearson	29,545 <sup>a</sup>	1	0,000		
Kontinuitätskorrektur <sup>b</sup>	28,217	1	0,000		
Likelihood-Quotient	30,145	1	0,000		
Exakter Test nach Fisher				0,000	0,000
Zusammenhang linear-mit-linear	29,445	1	0,000		
Anzahl der gültigen Fälle	296				

a. 0 Zellen (,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5. Die minimale erwartete Häufigkeit ist 47,01.

b. Wird nur für eine 2x2-Tabelle berechnet  
df=Anzahl der Freiheitsgrade

Tab. 23

Es konnte also gezeigt werden, dass das Sternoclaviculargelenk im MRT signifikant besser mit reinen T1w-/T2w-Sequenzen dargestellt und beurteilt werden kann als mit modifizierten Sequenzen wie der Haste- oder Opposed Phase-Sequenz.

### 5.3.5 Vergleich verschiedener modifizierter Sequenzen

Im vorangehenden Abschnitt konnte gezeigt werden, dass modifizierte Sequenzen keinen Vorteil für die Beurteilbarkeit der Aufnahmen darstellen. Da für bestimmte Fragestellungen trotzdem modifizierte Sequenzen vorhanden sein bzw. gewünscht werden können, sollen am Beispiel von Haste, In Phase und Opposed Phase exemplarisch modifizierte Sequenzen untereinander verglichen werden.

#### Vergleich von Aufnahmen in In-Phase- und Aufnahmen in Opposed-Phase-Sequenz

Insgesamt wurden 78 In-Phase-Aufnahmen analysiert, von denen 6 (7,7%) sehr gut beurteilt werden konnten. Von 198 Opposed-Phase-Aufnahmen erhielten dieses Urteil 73 (36,9%) Aufnahmen (siehe Tab. 24). Dass dieser Unterschied signifikant ist, zeigt der im Anschluss durchgeführte Qui-Quadrat-Test (siehe Tab. 25). Mit Opposed-Phase-Aufnahmen können die MRT-Bilder des Sternoclaviculargelenks also signifikant besser beurteilt werden als mit In-Phase-Aufnahmen.

***Vergleich der Beurteilbarkeit von In-Phase-Sequenzen  
und Opposed-Phase-Sequenzen***

Aufnahme	Beurteilbarkeit: sehr gut		Gesamt
	nein	ja	
In Phase	72 (92,3%)	6 (7,7%)	78 (100%)
Opposed Phase	125 (63,1%)	73 (36,9%)	198 (100%)
gesamt	197 (71,4%)	79 (28,6%)	276 (100%)

Tab. 24

**Signifikanzprüfung zum Vergleich der Beurteilbarkeit von In-Phase-Sequenzen und Opposed-Phase-Sequenzen**

	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (1-seitig)
Chi-Quadrat nach Pearson	23,315 <sup>a</sup>	1	0,000		
Kontinuitätskorrektur <sup>b</sup>	21,909	1	0,000		
Likelihood-Quotient	27,532	1	0,000		
Exakter Test nach Fisher				0,000	0,000
Zusammenhang linear-mit-linear	23,231	1	0,000		
Anzahl der gültigen Fälle	276				

a. 0 Zellen (,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5. Die minimale erwartete Häufigkeit ist 22,33.

b. Wird nur für eine 2x2-Tabelle berechnet

df=Anzahl der Freiheitsgrade

Tab. 25

Vergleich von Aufnahmen in Haste- und Aufnahmen in Opposed-Phase-Sequenz

Von den 198 Opposed-Phase-Aufnahmen konnten 73 (36,9%) sehr gut beurteilt werden, von den 176 Haste-Aufnahmen 55 (31,3%) (siehe Tab. 26). Im Qui-Quadrat-Test zeigte sich, dass dieser Unterschied nicht signifikant ist (siehe Tab. 27), die mediale Claviculaepiphyse kann also in der Opposed-Phase-Sequenz nicht signifikant besser beurteilt werden als in der Haste-Sequenz.

**Vergleich der Beurteilbarkeit von Haste-Sequenzen und Opposed-Phase-Sequenzen**

Aufnahme	Beurteilbarkeit: sehr gut		Gesamt
	nein	ja	
Haste	121 (68,8%)	55 (31,3%)	176 (100%)
Opposed Phase	125 (63,1%)	73 (36,9%)	198 (100%)
gesamt	246 (65,8%)	128 (34,2%)	374 (100%)

Tab. 26

**Signifikanzprüfung zum Vergleich der Beurteilbarkeit von Haste-Sequenzen und Opposed-Phase-Sequenzen**

	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (1-seitig)
Chi-Quadrat nach Pearson	1,307 <sup>a</sup>	1	0,253		
Kontinuitätskorrektur <sup>b</sup>	1,069	1	0,301		
Likelihood-Quotient	1,310	1	0,252		
Exakter Test nach Fisher				0,276	0,151
Zusammenhang linear-mit-linear	1,303	1	0,254		
Anzahl der gültigen Fälle	374				

a. 0 Zellen (,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5. Die minimale erwartete Häufigkeit ist 60,24.

b. Wird nur für eine 2x2-Tabelle berechnet

df=Anzahl der Freiheitsgrade

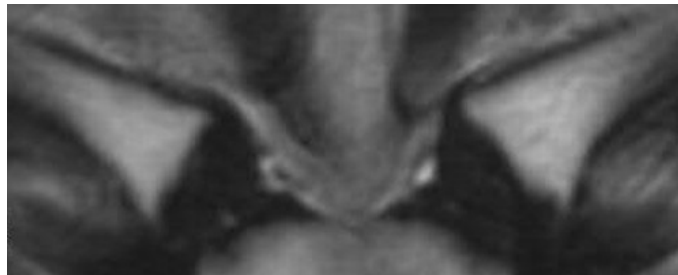
Tab. 27

## 5.4 Ausgewählte Patientenbeispiele

Im Folgenden sollen MRT-Aufnahmen des Patientenkollektivs hinsichtlich der verschiedenen Stadien demonstriert werden. Darüber hinaus werden MRT- und CT-Aufnahmen vergleichend dargestellt, Beispiele für Seitendifferenzen gegeben, Sequenzen im Vergleich gezeigt sowie die Reifungsstadien im Verlauf illustriert.

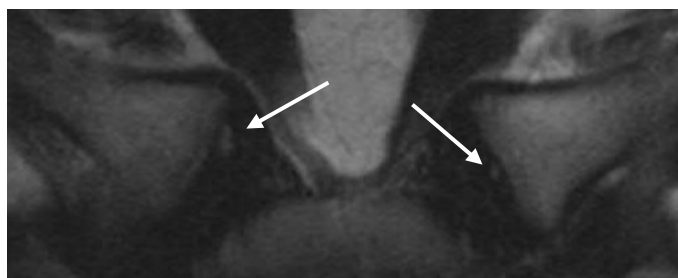
### 5.4.1 Beispiele für die Ossifikationsstadien der Clavicula im MRT

#### Stadium 1

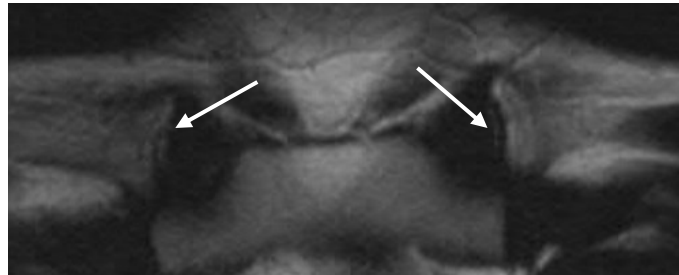


*Abb. 21 Patientin 15 Jahre 0 Monate, Aufnahme Thorax coronar T2w.  
Es sind keine Ossifikationskerne der medialen Claviculaepiphysen erkennbar.*

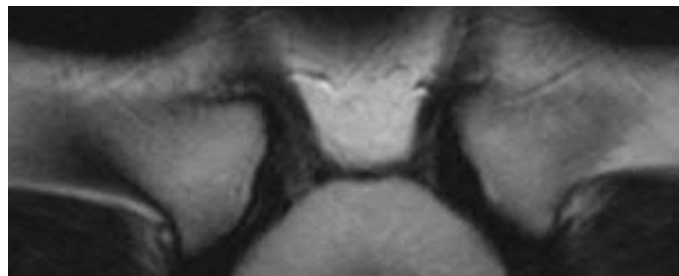
#### Stadium 2



*Abb. 22 Patient 16 Jahre 1 Monat, Aufnahme Thorax coronar T2w.  
Bei beiden Claviculae ist ein isolierter Knochenkern erkennbar (Pfeile), es liegt keine Fusion mit der Clavicula vor. Die Achsen der Kerne verlaufen schräg zu den Grenzlamellen der Claviculae.*

Stadium 3

*Abb. 23 Patient 17 Jahre 5 Monate, Aufnahme Halsweichteile coronar T2w.  
Man erkennt eine partielle Verschmelzung der Ossifikationskerne mit den Claviculae. Die Knochenkerne sind nun parallel zu den Grenzlamellen der Claviculae (Pfeile).*

Stadium 4

*Abb. 24 Patientin 24 Jahre 5 Monate, Aufnahme Halsweichteile coronar T2w.  
Die Knochenkerne sind vollständig mit den Claviculaepiphysen verschmolzen.  
Es liegt also eine abgeschlossene Ossifikation der Sternoklavikulargelenke vor.*

### 5.4.2 Beispiele für den Vergleich MRT - CT

Im Folgenden soll anhand von MRT- und CT-Aufnahmen der Sternoklavikulargelenke die analoge Beurteilbarkeit der vier Ossifikationsstadien bei beiden Methoden demonstriert werden. Die Patientenbeispiele hierzu stammen jeweils von ein und demselben Patienten und wurden jeweils nahezu zeitgleich angefertigt.

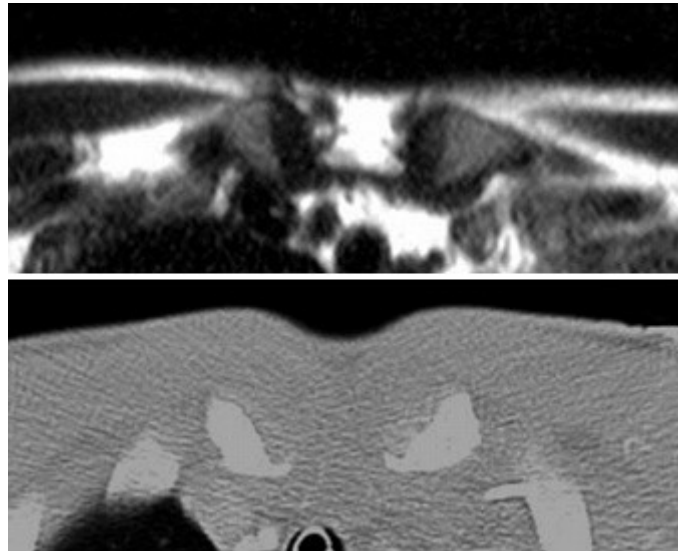
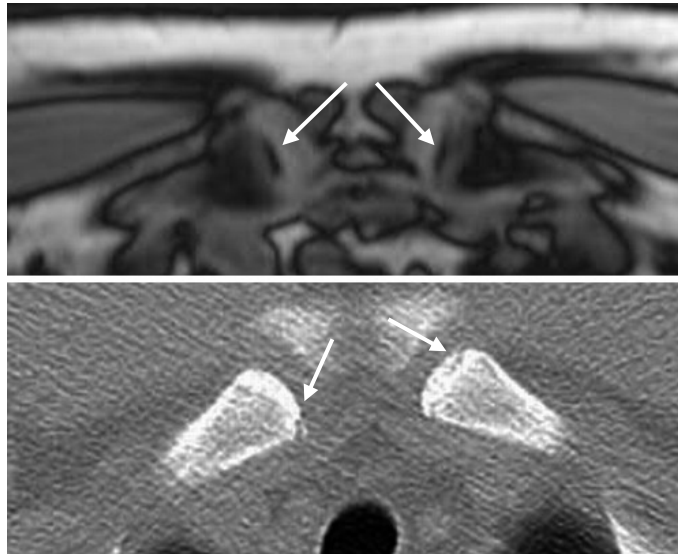
Stadium 1

Abb. 25 Patient 13 Jahre 3 Monate. Oben: MRT Thorax transv. Haste T2w. Unten: CT. In beiden Aufnahmen sind keine Ossifikationskerne erkennbar.

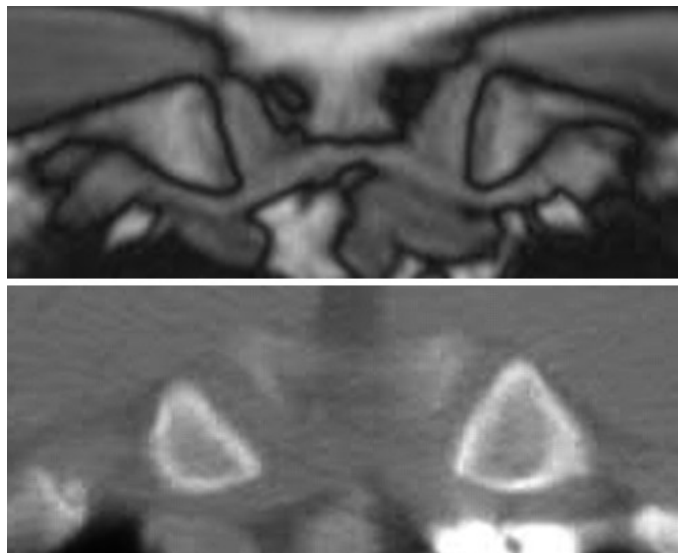
Stadium 2

Abb. 26 Patient 16 Jahre 1 Monat. Oben: MRT Thorax coronar T2w. Unten: CT. Bei beiden Untersuchungen zeigen sich isolierte Ossifikationskerne (Pfeile), die schräg zur Claviculaepiphyse zur Abbildung kommen.



Stadium 3

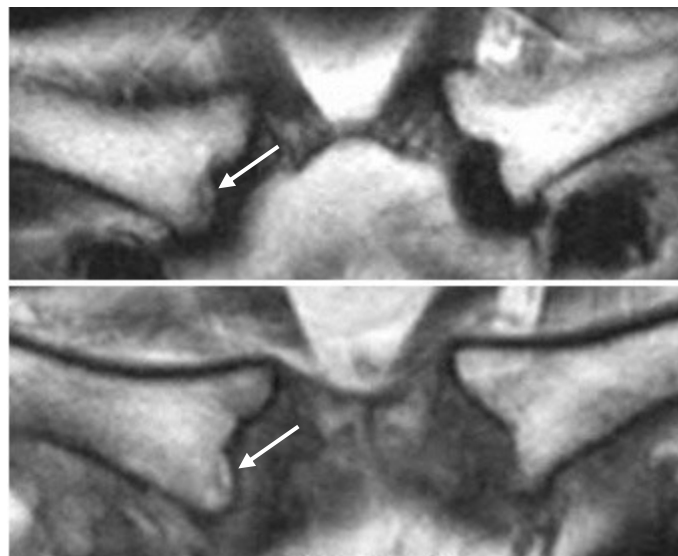
*Abb. 27 Patient 19 Jahre 3 Monate. Oben: MRT Thorax transv. Op Ph. T1w. Unten: CT. In beiden Aufnahmen erkennt man Knochenkerne, die partiell mit den Claviculae fusioniert sind. Ihre Achsen sind parallel zu den Grenzlamellen der Claviculae (Pfeile).*

Stadium 4

*Abb. 28 Patient 22 Jahre 7 Monate. Oben: MRT Thorax transv. Op Ph. T1w. Unten: CT. Bei beiden Untersuchungen zeigen sich vollständig ossifizierte Claviculae.*

### 5.4.3 Beispiele für Patienten mit Seitendifferenz

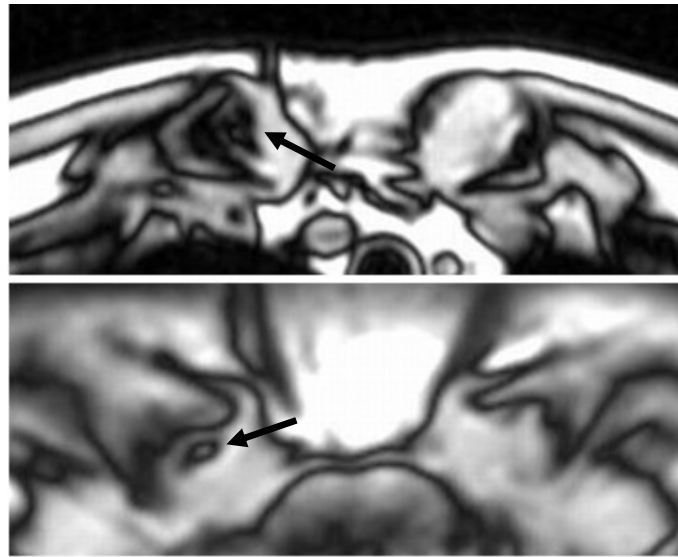
Bei der Beurteilung der Sternoklavikulargelenke wurden immer sowohl die rechte als auch die linke Clavicula in die Auswertung einbezogen. Bei Asymmetrien war, entsprechend dem Vorgehen im CT, die für die Einordnung ausschlaggebende Seite die linke. Wie sich solche Seitendifferenzen darstellen können, illustrieren exemplarisch die beiden nachstehenden Beispiele.



*Abb. 29 Patient 22 Jahre 6 Monate*

*Aufnahme Halsweichteile coronar T2w (oben) bzw. T1w (unten).*

*Die rechte Clavicula zeigt eine partielle Fusion des Ossifikationskerns (Pfeile) mit der Diaphyse (Stadium III). Bei der linken Clavicula dagegen liegt eine vollständige Verschmelzung vor (Stadium IV).*



*Abb. 30 Patient 17 Jahre 3 Monate*

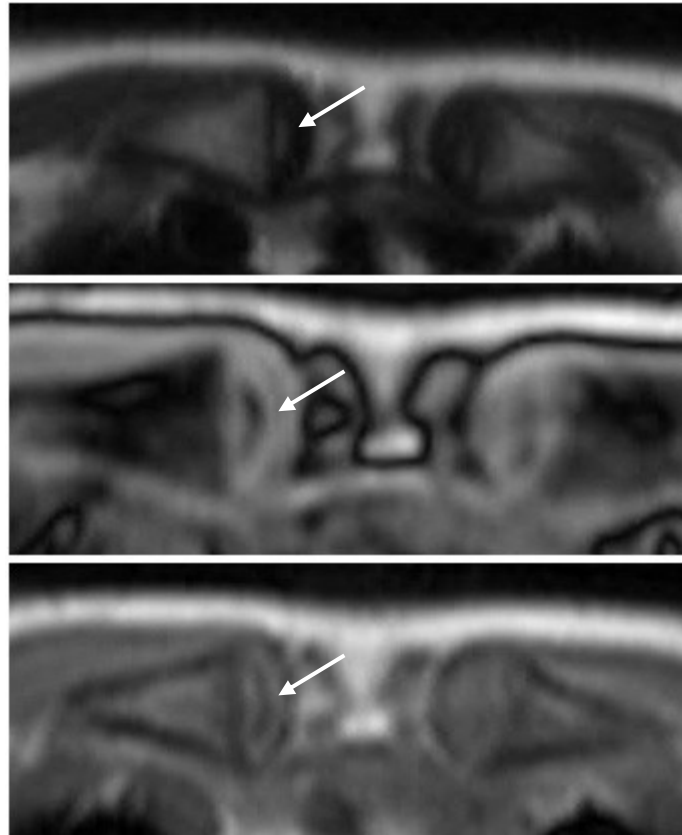
*Aufnahme Thorax transversal (oben) bzw. coronar (unten) Opposed Phase T1w.*

*Bei der linken Clavicula ist kein Knochenkern erkennbar (Stadium I).*

*Die rechte Clavicula entspricht aufgrund der isolierten Ossifikationskerne (Pfeile) Stadium II.*

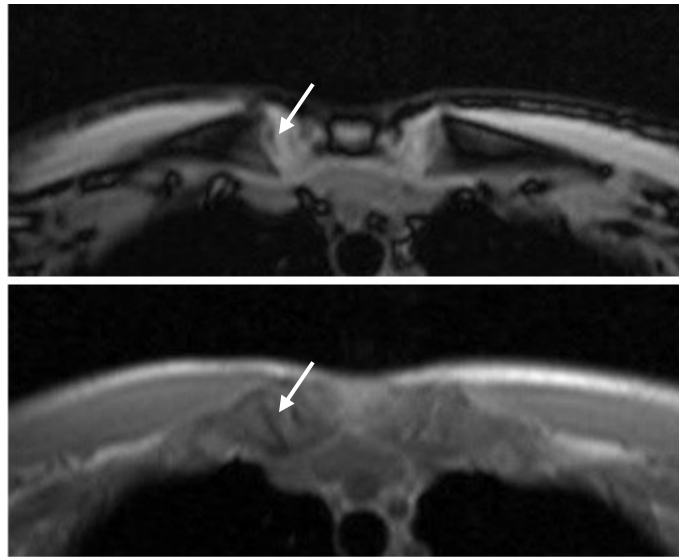
#### **5.4.4 Beispiele für verschiedene Aufnahmearten im Vergleich**

In Kapitel 5.3 wurde dargestellt, welchen Einfluss die verschiedenen Aufnahme-Ebenen, Wichtungen und Sequenzen auf die Qualität und damit auch auf die Beurteilbarkeit der MRT-Aufnahmen haben. Im folgenden Abschnitt nun sollen diese Unterschiede anhand einiger Bildbeispiele illustriert werden.



*Abb. 31 Patientin 13 Jahre 10 Monate, Stadium II.  
Das oberste Bild zeigt eine transversale Thorax-Schicht in T2w Haste-Sequenz.  
Der isolierte Knochenkern (Pfeil) zeichnet sich ähnlich gut ab wie in der  
mittleren Opposed-Phase-Aufnahme (T1w). In der In-Phase-Sequenz (unteres  
Bild) hingegen lässt sich der Knochenkern vor allem auf der linken Seite  
höchstens erahnen oder in Kenntnis der anderen Aufnahmen schemenhaft  
erkennen.*

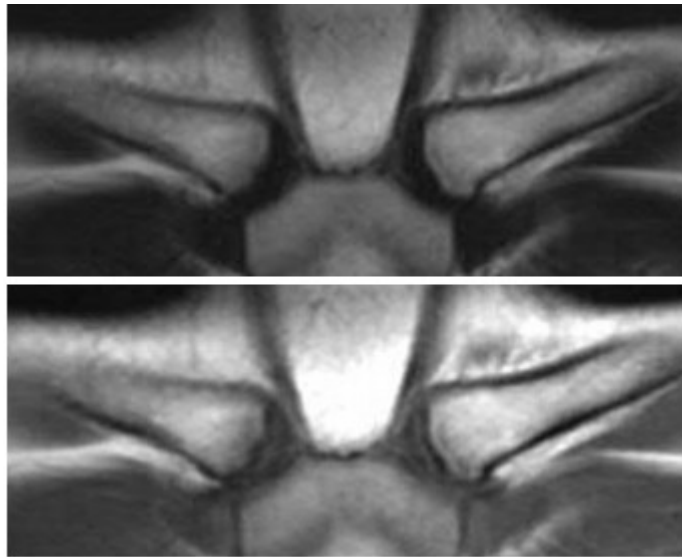
Die in Abb. 31 illustrierten Unterschiede decken sich mit den Ergebnissen aus Kapitel 5.3, welche aussagen, dass die Haste- und die Opposed-Phase-Sequenz ähnlich gut beurteilbar sind, die In-Phase-Sequenz dagegen deutlich schlechter zur Auswertung der Reifungsstadien der Claviculaepiphyse herangezogen werden kann.



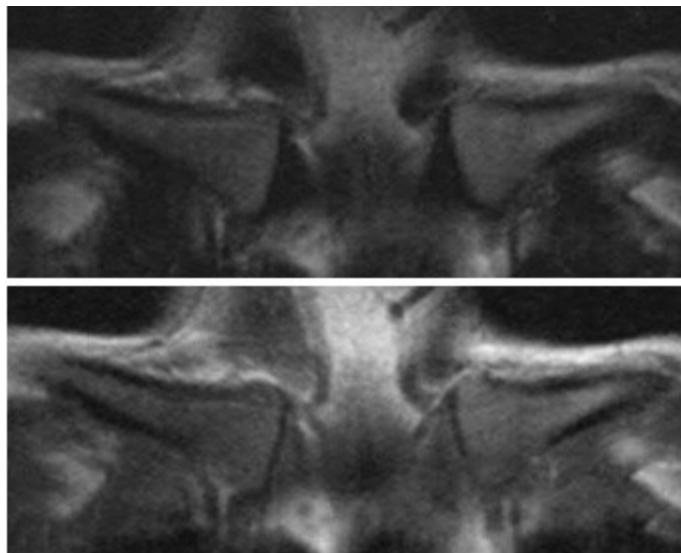
*Abb. 32 Patient 17 Jahre 10 Monate, Stadium III.  
Oberes Bild: Thorax transversal T1w Opposed-Phase  
Unteres Bild: Thorax transversal T1w In-Phase  
Die Beurteilbarkeit der Ossifikationskerne (Pfeil) ist in der oberen Aufnahme deutlich besser als in der unteren Aufnahme.*

Die abgebildeten Aufnahmen (Abb. 32) zeigen ebenso wie das vorangehende Beispiel die bessere Beurteilbarkeit der Opposed-Phase-Sequenz (oberes Bild) gegenüber der In-Phase-Sequenz (unteres Bild).

Die beiden nachfolgenden Patientenbeispiele (Abb. 33 und Abb. 34) illustrieren den Unterschied zwischen T1w- und T2w-Aufnahmen. Das obere Bild zeigt jeweils die T2w-Sequenz, das untere jeweils die T1w-Sequenz. Beide Beispiele weisen eine sehr gute Beurteilbarkeit auf. Die stärkeren Kontraste im T2w-Bild lassen die Vermutung zu, dass dies auch eine bessere Beurteilbarkeit nach sich zieht. Dies konnte allerdings in der gesamten Auswertung und innerhalb einzelner Sequenzen nicht statistisch signifikant bestätigt werden (siehe Kapitel 5.3.3).



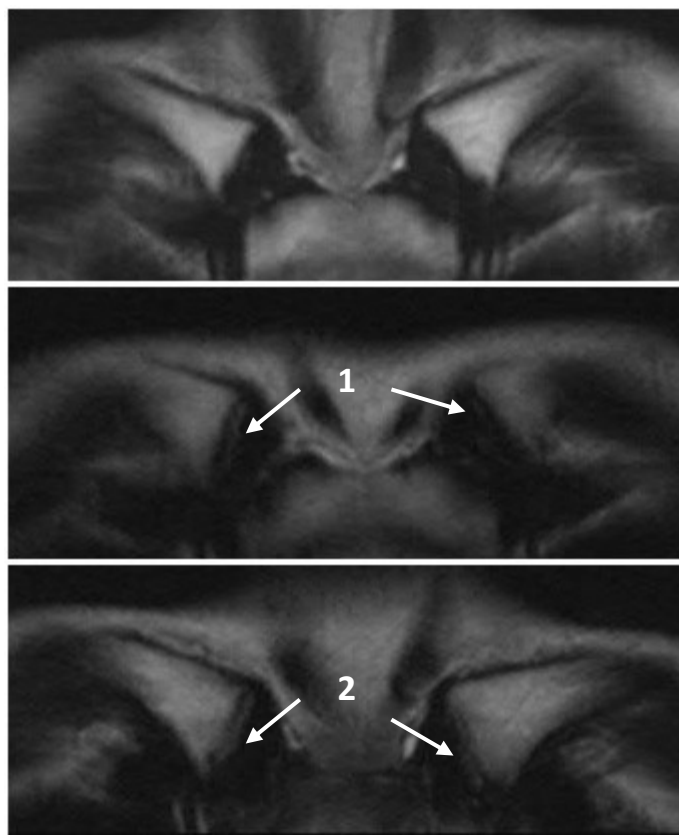
*Abb. 33 Patientin 22 Jahre 7 Monate, Stadium IV.  
Oberes Bild: Halsweichteile coronar T2w  
Unteres Bild: Halsweichteile coronar T1w  
In beiden Abbildungen ist die vollständige Ossifikation der  
Sternoklavikulargelenke sehr gut zu beurteilen. Es besteht kein  
Unterschied zwischen T1w und T2w.*



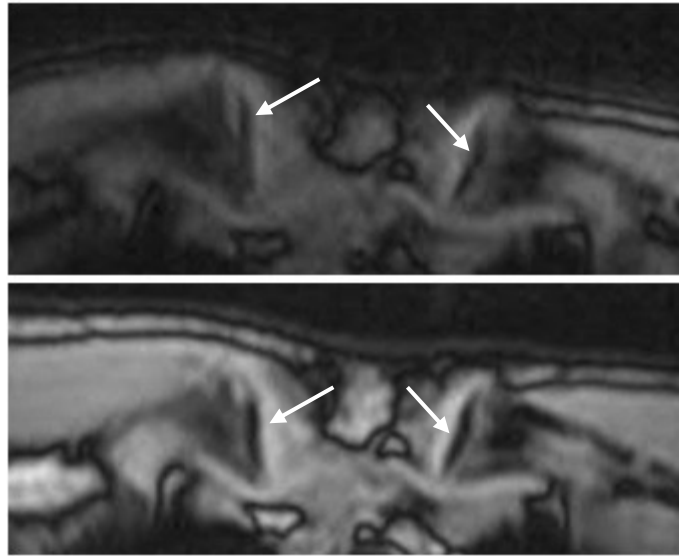
*Abb. 34 Patientin 30 Jahre 3 Monate, Stadium IV.  
Oberes Bild: Halsweichteile coronar T2w  
Unteres Bild: Halsweichteile coronar T1w  
Beide Abbildungen illustrieren die selbe sehr gute Beurteilbarkeit  
von T1- und T2-gewichteten Aufnahmen.*

### 5.4.5 Beispiele für Patienten im Verlauf

Nachfolgend sollen zwei Patientenbeispiele vorgestellt werden, bei denen über den Zeitraum mehrerer Jahre Verlaufskontrollen zur Auswertung vorlagen. Anhand dieser Beispiele kann die individuelle Entwicklung der Claviculareifung über mehrere Stadien nachvollzogen werden.



**Abb. 35**    *Entwicklung der Claviculaepiphyse. Aufnahmen: Thorax coronar T2w.*  
*Die oberste Aufnahme zeigt die Sternoklavikulargelenke der Patientin im Alter von 14 Jahren und 7 Monaten. Man kann kein Ossifikationszentrum erkennen (Stadium I). Gut zwei Jahre später (16 Jahre 8 Monate) wird ein länglicher Knochenkern sichtbar (Pfeile 1), der Abstand zum Sternum hat sich verringert (Stadium II). Ein weiteres Jahr später (17 Jahre 9 Monat) ist der Abstand zum Sternum noch geringer geworden und der Knochenkern ist bereits partiell mit der Clavicula verschmolzen (Pfeile 2), dies entspricht nun Stadium III.*



**Abb. 36**    *Entwicklung der Claviculaepiphyse von Stadium III zu Stadium IV.  
Aufnahmen: Thorax transversal Opposed Phase T1w.  
Der Patient ist zum Zeitpunkt der oberen Aufnahme 21 Jahre und 10 Monate alt. Man erkennt deutlich auf beiden Seiten den länglichen Knochenkern (Pfeil), der allerdings vor allem rechts nur partiell mit der Diaphyse verschmolzen ist, also Stadium III entspricht. In der unteren Aufnahme zeigt sich auch auf der rechten Seite eine vollständige Fusion von Ossifikationskern und Diaphyse (Pfeil), der Patient kann nun, im Alter von 23 Jahren und einem Monat, Stadium IV zugeordnet werden.*



## **6 Diskussion**

### **6.1 Vergleichende Betrachtung der Ergebnisse**

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Fragestellung, ob die Magnetresonanztomografie eine geeignete Methode ist, um anhand der Beurteilung der Entwicklungsstufen der medialen Claviculaepiphyse Rückschlüsse auf das Alter der untersuchten Person ziehen zu können. Aktuell stellt für diese Form der forensischen Altersdiagnostik die Auswertung mittels Computertomografie den Goldstandard dar. Da diese Untersuchungsmethode allerdings mit einer nicht zu vernachlässigenden Strahlenbelastung einhergeht und die untersuchten Personen überwiegend junge, gesunde Erwachsene sind, stellt sich die Frage nach alternativen Möglichkeiten (Ritz-Timme et al. 2000). Frühere Studien zeigten, dass die Magnetresonanztomografie ein geeignetes Verfahren ist, um die Anatomie der Sternoklavikulargelenke darzustellen (Brossmann et al. 1996).

Als vergleichende Computertomografie-Studie und Referenz für die Einteilung der Ossifikation der medialen Claviculaepiphyse in vier Stadien diene für die vorliegende Magnetresonanztomografie-Studie die Untersuchung von Kreitner et al. 1998 (Kreitner et al. 1998).

Die Studie von Kreitner umfasst insgesamt 380 Patienten, 75 Patienten (20%) konnten Stadium 1 zugeordnet werden, 70 Patienten (18%) Stadium 2, 103 Patienten (27%) Stadium 3 und für 132 Patienten (35%) wurde Stadium 4 ermittelt. In die vorliegende Untersuchung konnten 339 Patienten einbezogen werden, davon entsprachen 59 Personen (17%) Stadium 1, 88 Personen (26%) Stadium 2, 103 Personen (30%) Stadium 3 und 89 Personen (26%) Stadium 4.

Da die von Kreitner untersuchten Patienten im Alter von Null bis 9 Jahren zu 100% Stadium 1 zugeordnet werden konnten und eigene vorab durchgeführte Stichproben dieser Altersklasse dasselbe Ergebnis erbrachten, wurde für die vorliegende Arbeit ein

Patientenkollektiv ab dem 10. Lebensjahr festgelegt. Berücksichtigt man, dass sich bei Kreitner 40 Patienten in dem für diese Untersuchung ausgeschlossenen Altersbereich lagen, kann für beide Arbeiten eine annähernde gleiche Gesamtzahl an ausgewerteten Patienten ermittelt werden. Auch die prozentuale Verteilung der untersuchten Personen über die vier Stadien kann als vergleichbar angesehen werden.

Betrachtet man darüber hinaus die geschlechtsspezifische Aufteilung der Patienten, finden sich bei Kreitner 229 (60,2%) männliche und 151 (39,8%) weibliche Patienten, in dieser Arbeit 186 (54,9%) männliche und 153 (45,1%) weibliche Personen. Demnach können auch bezüglich geschlechtsspezifischer Auswertungen die Ergebnisse vergleichend behandelt werden.

Weiterhin charakterisiert wird das Patientenkollektiv von Kreitner durch den großen Anteil (50,5%) an Patienten mit Tumorerkrankungen. Eine ähnliche Gewichtung bezüglich der Diagnosen der untersuchten Personen lag mit einem Anteil an Tumorerkrankungen von 75,8% auch im ausgewerteten Patientenkollektiv vor.

Da die Studienkollektive beider Untersuchungen in mehreren wichtigen Merkmalen sehr ähnlich sind, können auch die Ergebnisse beider Arbeiten vergleichend betrachtet werden.

Kreitner konnte für das Stadium 1 (keine Ossifikation der medialen Claviculaepiphyse) einen Altersbereich der Patienten von Null bis 16 Jahren ermitteln, in dieser Arbeit lag der Bereich bei 10 bis 17 Jahren.

Erstmalig beobachtet wurde ein Auftreten eines Ossifikationskernes (Stadium 2) bei Kreitner zwischen 11 und 22 Jahren, in dieser Arbeit zwischen 13 und 19 Jahren. Das mittlere Alter für Stadium 2 lag bei Kreitner bei 16,1 Jahren und in dieser Auswertung bei 16,3 Jahren, sodass die beiden Arbeiten ein nahezu identisches Ergebnis bezüglich des Beginns der Ossifikation der medialen Claviculaepiphyse erbringen.

Stadium 3, also eine partielle Fusion von Knochenkern und Clavicula, erstreckt sich bei Kreitner über eine Altersspanne von 16 bis 26 Jahren, in dieser Arbeit von 15 bis 22 Jahren. Auch hinsichtlich des mittleren Alters für Stadium 3 finden sich Unterschiede. Bei Kreitner lag dieses bei 20,9 Jahren mit einer Standardabweichung von 2,2 Jahren, in dieser Untersuchung lag das mittlere Alter bei 18,6 Jahren mit einer Standardabweichung von 1,5 Jahren.

Eine vollständige Verschmelzung von Knochenkern und Clavicula (Stadium 4) beobachtet Kreitner ab dem 22. Lebensjahr, in dieser Arbeit wurde Stadium vier erstmals mit 19 Jahren beobachtet. Dieser Unterschied kann dadurch erklärt werden, dass in dieser Untersuchung ein Lebensalter von 19 und 20 Jahren für Stadium 4 jeweils nur einmal, ein Lebensalter von 21 Jahren nur zweimal für Stadium 4 ermittelt wurde, es sich also bei den relativ jungen Altersgruppen um statistische Ausreißer handelt, was sich in einem 95%-Referenzbereich für Stadium 4 von 21 bis 30 Jahren bestätigt. Ebenso vergleichbar ist das mittlere Alter für Stadium 4 in beiden Arbeiten, bei Kreitner lag dieses bei 26,1 Jahren, in dieser Auswertung bei 25,3 Jahren.

Innerhalb der vier Stadien liegen in beiden Arbeiten gewisse Streubreiten der zugeordneten Lebensjahre vor, sodass für jedes Stadium bzw. jede Ossifikationsstufe nicht ein bestimmtes Lebensalter, sondern ein bestimmter Altersbereich ermittelt werden kann.

Nach der statistischen Auswertung der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigte sich, dass die Altersunterschiede zwischen allen Stadien signifikant sind. Dies bedeutet, dass mit der Magnetresonanztomografie zuverlässig verschiedene Entwicklungsstadien in verschiedenen Altersstufen gegeneinander abgegrenzt werden können und somit die MRT eine aussagekräftige Methode zur Altersdiagnostik darstellt.

Kreitner konnte darüber hinaus in seiner Untersuchung keinen signifikanten Unterschied in der Entwicklung der medialen Claviculaepiphyse zwischen männlichen und weiblichen Patienten ermitteln. Entgegen der Vermutung, dass aufgrund der

unterschiedlichen Pubertätsentwicklung von weiblichen und männlichen Jugendlichen auch die Clavicula-Entwicklung zeitlich versetzt abläuft, kam auch diese Arbeit zum selben Ergebnis, es konnte weder für das gesamte Patientenkollektiv noch innerhalb der einzelnen vier Stadien ein signifikanter Unterschied im Alter der männlichen und weiblichen Probanden verifiziert werden.

Asymmetrien in der Entwicklung von rechter und linker Claviculaepiphyse wurden in dieser Arbeit, ebenso wie in der Arbeit Kreitners, nur in wenigen Fällen beobachtet und erreichten keine statistische Signifikanz. Beim Vorliegen einer solchen Asymmetrie wurde die untersuchte Person, entsprechend dem aktuellen Vorgehen bei der forensischen Altersdiagnostik anhand von Computertomografie-Aufnahmen, stets nach dem Entwicklungsstand der linken Clavicula dem entsprechenden Stadium zugeordnet.

## **6.2 Empfehlungen für die Anwendung der MRT zur Beurteilung der Sternoklavikulargelenke**

Weitergehende Zielstellung der Arbeit war darüber hinaus, verschiedene Möglichkeiten der Bildgebung mittels Magnetresonanztomografie zu evaluieren und Empfehlungen für eine zukünftige Altersdiagnostik geben zu können.

Betrachtet man zunächst die Aufnahmeart, so zeigt sich, dass Halsweichteil-Untersuchungen besser geeignet sind zur Analyse der Sternoklavikulargelenke als Darstellungen des Thorax. Bezüglich der Schnittebenen stellten sich coronare Schnittbilder besser dar als transversale Schnittbilder. Sagittale Schnitte durch die mediale Claviculaepiphyse wurden bereits zu Beginn der Untersuchung als nicht verwertbar ermittelt und deshalb nicht weitergehend behandelt.

Bei der Wichtung der MRT-Aufnahmen ließ sich kein Benefit für T1w oder T2w bei der Darstellung der Sternoklavikulargelenke eruieren. Dies gilt sowohl für das Gesamtkollektiv als auch im Vergleich innerhalb der Halsweichteil- bzw. Thorax-

Aufnahmen. Die Begründung dafür findet sich in der Technik des MRTs (siehe Abschnitt 2.4) bzw. der Anatomie des Gelenkes, da sowohl kortikaler als auch spongiöser Knochen in beiden Sequenzen, T1w und T2w, signallos (schwarz) zur Abbildung kommt. Ebenso wird (Gelenk-)Knorpel jeweils in mittlerer bzw. geringer Signalintensität (grau) dargestellt (Breitenseher 2003). Folglich kann keine Empfehlung hinsichtlich einer Bevorzugung von T1w oder T2w für eine Beurteilung der Sternoklavikulargelenke im MRT gegeben werden.

Bezüglich der Schichtdicken der MRT-Aufnahmen konnten keine statistisch aussagefähigen Ergebnisse erzielt werden, da die Angaben dazu nicht in allen ausgewerteten Untersuchungen mit ausreichender Genauigkeit zur Verfügung standen. Es zeigte sich allerdings, dass die Verbesserung der Beurteilbarkeit der Sternoklavikulargelenke deutlich mit der Abnahme der Schichtdicke korrelierte, die medialen Claviculaenden also in dünneren Schichten besser beurteilt werden konnten als in dickeren Schichten. Bestätigt werden konnte diese Tendenz durch im Anschluss angefertigte Aufnahmen mit einer Schichtdicke von 3mm, die eine ausgezeichnete Beurteilbarkeit aufwiesen.

Beschäftigt man sich desweiteren mit den möglichen Sequenzen in der MR-Bildgebung, konnte ein signifikanter Vorteil der reinen T1w-/T2w-Sequenzen gegenüber den modifizierten Sequenzen wie Haste oder Opposed-Phase gezeigt werden. Eine Begründung hierfür findet sich in den eigentlichen Anwendungsgebieten dieser Sequenzen, da beispielsweise die Haste-Sequenz nicht primär ihren Einsatz in der Skelett-Diagnostik findet und so für die hier untersuchten Gelenke nicht Mittel der Wahl darstellt. Innerhalb der modifizierten Sequenzen zeigte sich lediglich eine Überlegenheit der Opposed-Phase-Sequenz gegenüber der In-Phase-Sequenz, was in der Praxis aufgrund der generellen Überlegenheit der reinen T1w-/T2w-Sequenzen keine Rolle spielen dürfte.

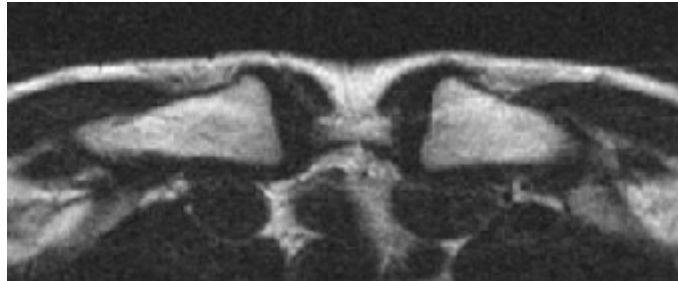
Im Folgenden sollen diese Empfehlungen für die Anwendung der Magnetresonanztomografie zur Beurteilung der Sternoklavikulargelenke anhand eines repräsentativen Sequenzprotokolls zusammenfassend dargestellt werden:

### MRT-Untersuchung der Halsweichteile mit Erfassung der Sternoklavikulargelenkregion

1. Scout in drei Orientierungen (transversal, coronar, sagittal)
2. T2w TSE transversal 3mm
3. T1w TSE coronar 3mm

Die Gesamtdauer für die Aufnahme dieser Sequenzen beträgt insgesamt etwa 12 Minuten und liegt damit in der Nähe der für die vergleichbaren CT-Untersuchungen benötigten Zeit.

Die nachfolgende Abb. 37 zeigt beispielhaft eine nach dem oben genannten Sequenzprotokoll erstellte transversale Halsweichteil-Aufnahme in T2w mit 3mm Schichtdicke.



*Abb. 37 Patientin 31 Jahre 8 Monate, Stadium IV*

## **6.3 Vergleichende Auswertung von MRT- und CT-Aufnahmen**

Lagen bei einem Patienten zum annähernd gleichen Zeitpunkt sowohl eine MRT- als auch eine CT-Aufnahme der Sternoklavikulargelenke vor, wurden beide Aufnahmen vergleichend im Hinblick auf Bildeigenschaften, Bildqualität und Stadienugehörigkeit analysiert. Bei 86 Patienten konnte diese zusätzliche Auswertung durchgeführt werden. In allen Fällen konnte in den MRT-Aufnahmen eine vergleichbar gute Beurteilbarkeit sowie jeweils dasselbe Entwicklungsstadium der medialen

Claviculaepiphyse wie in den CT-Aufnahmen festgehalten werden. Diese Ergebnisse bekräftigen die Anwendbarkeit der Magnetresonanztomografie in Hinsicht auf die forensische Altersdiagnostik.

## **6.4 Methodik der Datenerhebung**

Um eine ausreichend hohe Anzahl an MRT-Aufnahmen der Sternoklavikulargelenke für statistisch aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, mussten die PACS-Daten von mehr als zehn Jahren zur Auswertung herangezogen werden. Grund dafür war zum Einen, dass die Sternoklavikulargelenke selbst nur in seltensten Fällen Ziel einer MRT-Untersuchung sind, es mussten also überwiegend Thorax- und Halsweichteil-Aufnahmen beurteilt werden. Je nach Untersuchungseinstellung waren auf diesen Aufnahmen die für die Auswertung erforderlichen Schnittebenen durch die mediale Claviculaepiphyse teilweise nicht oder nicht vollständig abgebildet, sodass ein Teil der Aufnahmen verworfen werden musste. Zum Anderen ist unter allen MRT-Aufnahmen der Altersbereich der 10- bis 30-jährigen nur gering vertreten innerhalb aller Altersstufen, da Patienten in diesem Lebensabschnitt wesentlich weniger von Krankheiten betroffen sind als Patienten höheren Alters.

Dies macht deutlich, dass ein retrospektives Studiendesign Mittel der Wahl war, um innerhalb eines vertretbaren Zeitraums eine ausreichend hohe Anzahl verwertbarer MRT-Aufnahmen der gewünschten Altersklassen vom 10. bis zum 30. Lebensjahr zu erhalten und auswerten zu können.

Neben der retrospektiven Analyse der MRT-Aufnahmen von 2001 bis 2008 wurden zusätzlich aktuell angefertigte Aufnahmen von September 2008 bis März 2009 in die Auswertung einbezogen, sodass es auch möglich war, Patienten im Verlauf und somit die Claviculaepiphyse in ihrer Entwicklung darzustellen.

Um die Validität der Ergebnisse weiter zu erhöhen sollten künftige Studien möglichst prospektiv, geblindet und mit einer hohen Anzahl an Untersuchungen durchgeführt werden.

## **6.5 Vorteile und Nachteile der Altersdiagnostik mittels MRT**

Der offensichtlichste Vorteil der forensischen Altersdiagnostik mit der Magnetresonanztomografie an Stelle der Computertomografie ist sicherlich der Verzicht auf die bei der CT unumgängliche Strahlenbelastung (Jurik et al. 1996). Dabei steht vor allem die schädigende Wirkung der Strahlung auf den Patienten selbst im Vordergrund (Jung 2000), gerade weil es sich in diesem Kontext um jugendliche Patienten handelt.

Weiterhin sollte auch in Betracht gezogen werden, dass die durch die Computertomografie verursachte Strahlenbelastung die Erteilung einer richterlichen Anordnung nach §81a der Strafprozessordnung bzw. eine zeitlich befristete besondere Genehmigung nach §21, Abs. 2 der Röntgenverordnung erforderlich macht, um eine forensische Altersdiagnostik durchführen zu können. Der Einsatz der Magnetresonanztomografie würde diese gesetzlichen Hürden umgehen können, da bei Einhaltung der Kontraindikationen von ihr keine Gefährdung für die zu untersuchende Person ausgeht.

Die mindestens gleichwertige Genauigkeit der Altersdiagnostik mit MRT im Vergleich zu CT konnte in dieser Arbeit gezeigt werden. Damit steht in Form der Magnetresonanztomografie ein weiteres leistungsfähiges Verfahren zur Altersdiagnostik zur Verfügung.

Gegen die Altersdiagnostik mittels Magnetresonanztomografie sprechen zum Einen sicherlich die höheren Kosten und die längeren Untersuchungszeiten im Vergleich zur Computertomografie. Zum Anderen müssten die jeweiligen Gutachter mit der neuen Methode zunächst vertraut gemacht werden, eine gewisse Einarbeitungszeit und Akzeptanz wäre erforderlich.

Entkräften könnte man diese Argumente wiederum damit, dass durch die Auswahl von lediglich zwei nötigen Sequenzen zur Erstellung der Aufnahmen auch die Untersuchungsdauer deutlich reduziert werden könnte, ebenso wie durch die Entwicklung neuer MRT-Technik (Frydman et al. 2003). Da die Erstellung forensischer



Gutachten zur Altersdiagnostik überwiegend Instituten der deutschen Universitätskliniken obliegt, wäre der Personenkreis, der an die neue Methode herangeführt werden müsste, ebenso überschaubar.

## **6.6      Ausblick auf weitere Möglichkeiten der Altersdiagnostik**

Der aktuelle Standard zur forensischen Altersdiagnostik in Deutschland ist unter anderem die Bewertung der Entwicklungsstadien der medialen Claviculaepiphyse in der Computertomografie. Vor allem aufgrund der damit verbundenen Strahlenbelastung für die überwiegend jungen Menschen wäre es wünschenswert, neue Verfahren zu etablieren, die auf diese Strahlenbelastung verzichten können (Rösing et al. 2002).

Eine mögliche Alternative wäre, die in dieser Arbeit vorgestellte Beurteilung der Entwicklung der Clavicula mittels Magnetresonanztomografie weitergehend zu untersuchen.

In diesem Zusammenhang könnten weitere Studien, in Analogie zu den vorliegenden CT-Studien (Muhler et al. 2006), den genaueren Einfluss der Schichtdicke auf die Beurteilbarkeit der Aufnahmen auch im MRT untersuchen. Darüber hinaus wäre es möglich, die vier Stadien der Epiphysenreifung im MRT weiter zu untergliedern in Stadium 2a/2b usw., wie dies für die Beurteilung mittels Computertomografie aktuell bereits untersucht wird. Hierbei wird nicht nur analysiert, ob ein Ossifikationszentrum vorhanden ist bzw. ob der Knochenkern partiell oder vollständig mit der Clavicula verschmolzen ist, sondern zu welchen Bruchteilen, z.B. zu 1/3, zu 2/3 etc., die Fusion bereits erfolgt ist. Auf diese Weise könnte eine noch exaktere Altersdiagnostik möglich werden. Ebenso wäre es möglich, auch im MRT eine Stadieneinteilung der Claviculaentwicklung in fünf Stadien zu untersuchen, wie dies Schmeling et al. 2003 getan haben (Schmeling et al. 2003). Stadium 5 bezieht sich dabei darauf, dass die Verschmelzungslinie zwischen Knochenkern und Clavicula nicht mehr erkennbar ist und somit eine vollständige Fusion vorliegt.

Darüber hinaus sollte auch mittels MRT zum einen der Frage nachgegangen werden, ob sich zwischen verschiedenen ethnischen Gruppen Unterschiede in der Entwicklung der Sternoklavikulargelenke eruieren lassen (Meijerman et al. 2007, Schmeling et al. 2006, Schmeling et al. 2000b, Schmeling et al. 2001a), und zum anderen, ob die Ergebnisse derartiger Studien eine Abhängigkeit vom Durchführungszeitpunkt zeigen, also ob die Entwicklungsstadien der Clavicula möglicherweise im Laufe von Jahrzehnten Veränderungen unterliegen (Kreitner et al. 1998).

Eine weitere Option stellt der Einsatz von Ultraschall zur Altersdiagnostik dar, da auch dieser ohne Strahlenbelastung auskommt.

Mentzel et al. 2005 führten eine Untersuchung an 160 Kindern und Jugendlichen durch, bei der sie zum selben Zeitpunkt sowohl eine Röntgenaufnahme der linken Hand mit Auswertung nach der Methode von Greulich und Pyle, als auch eine Ultraschalluntersuchung des linken Handgelenkes veranlassten. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass mit der neuen Ultraschallmethode zwar eine aussagekräftige Altersdiagnostik möglich sei, sie jedoch nicht die Röntgenaufnahme der linken Hand ersetzen könne, da Pathologien wie ein dissoziiertes Knochenalter, Fehlbildungen oder Mineralisationsstörungen mittels Ultraschall nicht ausreichend beurteilt werden könnten (Mentzel et al. 2005).

Schulz et al. 2008 untersuchten die medialen Claviculaepiphysen von 84 Probanden zwischen 12 und 30 Jahren mit Hilfe von Ultraschall. Eine Stadieneinteilung konnte bei 80 Patienten erfolgen, bei vier Patienten war dies aufgrund von Entwicklungsanomalien nicht möglich. Analog zu den Studien mit Computertomografie konnten vier Stadien ermittelt werden, das jüngste Alter für Stadium 2 belief sich auf 17,1 Jahre, für Stadium 3 auf 16,7 Jahre und für Stadium 4 auf 22,5 Jahre. Darüber hinaus konnten geschlechtsspezifische Unterschiede ermittelt werden. Mit größeren Studien und umfangreicheren Fallzahlen könnten diese Ergebnisse bestätigt werden und sich die forensische Altersdiagnostik mittels Ultraschall zu einer effizienten Methode ohne Belastung der Patienten durch ionisierende Strahlung entwickeln (Schulz et al. 2008b).

## 7 Schlussfolgerungen

Mit der vorliegenden Arbeit sollte untersucht werden, ob die Magnetresonanztomografie der Computertomografie im Kontext der forensischen Altersdiagnostik anhand der Ossifikation der medialen Claviculaepiphysen eine ebenbürtige Alternative ist.

Es konnte gezeigt werden, dass die Magnetresonanztomografie eine geeignete Methode ist, um die Ossifikationsstadien der Clavicula zuverlässig gegeneinander abzugrenzen. Die dabei ermittelten Altersunterschiede konnten statistisch signifikant nachgewiesen werden.

Auch im direkten Vergleich konnten mit der Magnetresonanztomografie die gleichen Ergebnisse erbracht werden wie mit der Computertomografie.

Als am besten geeignete Untersuchungskriterien für die Darstellung der Sternoklavikulargelenke im MRT stellten sich Aufnahmen der Halsweichteile in coronarer Schnittführung und reiner T1w- bzw. T2w-Sequenz mit einer Schichtdicke von 3mm heraus.

Mit der Magnetresonanztomografie steht darüber hinaus eine Methode zur Verfügung, die unter Verzicht auf ionisierender Strahlung arbeitet, was vor allem im Hinblick auf die bei der forensischen Altersdiagnostik überwiegend betroffenen jungen Menschen ein entscheidender Vorteil gegenüber der Computertomografie sein dürfte. Das Ziel dieser Arbeit, eine geeignete und zuverlässige Methode zur Altersdiagnostik im Strafverfahren zu finden, bei der keine Strahlenbelastung der untersuchten Person in Kauf genommen werden muss, wurde erreicht.

Es wird sich zeigen, ob diese neue Methode der Magnetresonanztomografie als Alternative zur Computertomografie Eingang finden wird in die gutachterliche Arbeit der forensischen Altersdiagnostik, ob die Magnetresonanztomografie die Computertomografie in diesem Kontext vielleicht eines Tages auch ersetzen wird.

# Literaturverzeichnis

- Benninghoff A, Drenckhahn D. Anatomie : makroskopische Anatomie, Histologie, Embryologie, Zellbiologie. München {[u.a.]: Elsevier.
- Breitenseher M. 2003. Der MR-Trainer untere Extremität : 48 Tabellen. Stuttgart {[u.a.]: Thieme.
- Brossmann J, Stabler A, Preidler KW, Trudell D, Resnick D. 1996. Sternoclavicular joint: MR imaging--anatomic correlation. Radiology, 198 (1):193-198.
- Bühl A. 2008. SPSS 16 : Einführung in die moderne Datenanalyse. 11., überarb. und erw. Aufl.. Aufl. München {[u.a.]: Pearson Studium.
- Bundesamt S. 2008. Datenreport 2008. Statistisches Bundesamt.
- Destouet JM, Gilula LA, Murphy WA, Sagel SS. 1981. Computed tomography of the sternoclavicular joint and sternum. Radiology, 138 (1):123-128.
- Fawcett. 1913. The Development and Ossification of the Human Clavicle. J Anat Physiol, 47 (Pt 2):225-234.
- Fleckner H. 1932. Roentgenographic Observations of the Times of Appearance of Epiphyses and their Fusion with the Diaphyses. J Anat, 67 (Pt 1):118-164 113.
- Frydman L, Lupulescu A, Scherf T. 2003. Principles and features of single-scan two-dimensional NMR spectroscopy. J Am Chem Soc, 125 (30):9204-9217.
- Fujita T, Orimo H, Ohata M, Yoshikawa M. 1968. Changes in the cortical thickness of the clavicle according to age. J Am Geriatr Soc, 16 (4):458-462.
- Greulich WW. 1950. The rationale of assessing the developmental status of children from roentgenograms of the hand and wrist. Child Dev, 21 (1):33-44.
- Greulich WW, Pyle SJ. 1976. Radiographic atlas of skeletal development of the hand and wrist. 2. Aufl. Stanford, Calif. {[u.a]: Univ. Press.
- Groskopf KW, Tischendorf R. 1964. Das normale menschliche Skelett in Röntgenskizzen : Entwicklung - Normalbild - Variationen. 2., erw. Aufl., unveränd. Nachdr. Aufl. Leipzig: Ed. Leipzig.
- Hatfield MK, Gross BH, Glazer GM, Martel W. 1984. Computed tomography of the sternum and its articulations. Skeletal Radiol, 11 (3):197-203.
- Helela T. 1969. Age-dependent variations of the cortical thickness of the clavicle. Ann Clin Res, 1 (2):140-143.
- Jit I, Kulkarni M. 1976. Times of appearance and fusion of epiphysis at the medial end of the clavicle. Indian J Med Res, 64 (5):773-782.
- Jung H. 2000. [The radiation risks from x-ray studies for age assessment in criminal proceedings]. Rofo, 172 (6):553-556.
- Jurik AG, Jensen LC, Hansen J. 1996. Radiation dose by spiral CT and conventional tomography of the sternoclavicular joints and the manubrium sterni. Skeletal Radiol, 25 (5):467-470.
- Kaur H, Jit I. 1990. Age estimation from cortical index of the human clavicle in northwest Indians. Am J Phys Anthropol, 83 (3):297-305.
- Köchli VD, Marinécek B. 1998. Wie funktioniert MRI? : eine Einführung in Physik und Funktionsweise der Magnetresonanzbildgebung. 2., aktualisierte Aufl.. Aufl. Berlin{[u.a.]: Springer.
- Köhler A, Zimmer EA, Freyschmidt J, Brossmann J. 2001. Grenzen des Normalen und Anfänge des Pathologischen in der Radiologie des kindlichen und erwachsenen Skeletts : Freyschmidt's "Köhler/Zimmer" ; 56 Tabellen. 14., vollkommen

- überarb., neu strukturierte und erw. Aufl. / Joachim Brossmann .... Aufl. Stuttgart {[u.a.]: Thieme.
- Kreitner KF, Schweden FJ, Riepert T, Nafe B, Thelen M. 1998. Bone age determination based on the study of the medial extremity of the clavicle. *Eur Radiol*, 8 (7):1116-1122.
- Kumar R, Madewell JE, Swischuk LE, Lindell MM, David R. 1989. The clavicle: normal and abnormal. *Radiographics*, 9 (4):677-706.
- Lippert H. 2003. Lehrbuch Anatomie : 183 Tabellen. 6., überarb. Aufl.. Aufl. München {[u.a.]: Urban & Fischer.
- Lockemann U, Fuhrmann A, Püschel K, Schmeling A, Geserick G. 2004. Empfehlungen für die Altersdiagnostik bei Jugendlichen und jungen Erwachsenen außerhalb des Strafverfahrens. *Rechtsmedizin*, 14:123-125.
- Lucet L, Le Loet X, Menard JF, Mejjad O, Louvel JP, Janvresse A, Daragon A. 1996. Computed tomography of the normal sternoclavicular joint. *Skeletal Radiol*, 25 (3):237-241.
- Marshall WA, Tanner JM. 1969. Variations in pattern of pubertal changes in girls. *Arch Dis Child*, 44 (235):291-303.
- Marshall WA, Tanner JM. 1970. Variations in the pattern of pubertal changes in boys. *Arch Dis Child*, 45 (239):13-23.
- Meijerman L, Maat GJ, Schulz R, Schmeling A. 2007. Variables affecting the probability of complete fusion of the medial clavicular epiphysis. *Int J Legal Med*, 121 (6):463-468.
- Mentzel HJ, Vilser C, Eulenstein M, Schwartz T, Vogt S, Bottcher J, Yaniv I, Tsoref L, Kauf E, Kaiser WA. 2005. Assessment of skeletal age at the wrist in children with a new ultrasound device. *Pediatr Radiol*, 35 (4):429-433.
- Muhler M, Schulz R, Schmidt S, Schmeling A, Reisinger W. 2006. The influence of slice thickness on assessment of clavicle ossification in forensic age diagnostics. *Int J Legal Med*, 120 (1):15-17.
- Nitz WR. 2007. Praxiskurs MRT : Anleitung zur MRT-Physik über klinische Bildbeispiele. Stuttgart {[u.a.]: Thieme.
- Ogden JA, Conlogue GJ, Bronson ML. 1979a. Radiology of postnatal skeletal development. III. The clavicle. *Skeletal Radiol*, 4 (4):196-203.
- Ogden JA, Conlogue GJ, Bronson ML, Jensen PS. 1979b. Radiology of postnatal skeletal development. II. The manubrium and sternum. *Skeletal Radiol*, 4 (4):189-195.
- Olze A, Reisinger W, Geserick G, Schmeling A. 2006. Age estimation of unaccompanied minors. Part II. Dental aspects. *Forensic Sci Int*, 159 Suppl 1:S65-67.
- Pictures M 2009. MRI Machine <http://www.health-pictures.com>.
- Reimer P. 2003. Klinische MR-Bildgebung : eine praktische Anleitung ; mit 139 Tabellen. 2. Aufl.. Aufl. Berlin {[u.a.]: Springer.
- Reiser M. 1992. Magnetresonanztomographie : mit 253 Tabellen. Berlin {[u.a.]: Springer.
- Reiser M. 1997. Magnetresonanztomographie : mit 150 Tabellen. 2., völlig überarb. und erw. Aufl.. Aufl. Berlin {[u.a.]: Springer.
- Reiser M. 2002. Magnetresonanztomographie : mit 161 Tabellen. 3., vollst. überarb. und aktualisierte Aufl.. Aufl. Berlin {[u.a.]: Springer.
- Ritz-Timme S, Cattaneo C, Collins MJ, Waite ER, Schutz HW, Kaatsch HJ, Borrman HI. 2000. Age estimation: the state of the art in relation to the specific demands of forensic practise. *Int J Legal Med*, 113 (3):129-136.

- Ritz S, Stock R, Schutz HW, Kaatsch HJ. 1995. Age estimation in biopsy specimens of dentin. *Int J Legal Med*, 108 (3):135-139.
- Rohen JW, Yokochi C, Lütjen-Drecoll E. 2002. Anatomie des Menschen : fotografischer Atlas der systematischen und topografischen Anatomie. 5., neubearb. Aufl.. Aufl. Stuttgart {[u.a.]: Schattauer.
- Rösing FW, Kaatsch HJ, Schmeling A, Alt KW, Hrg AKG. 2002. Jugendliche Straftäter und Asylsuchende: Ethische und humanbiologische Aspekte der Altersdiagnose.
- Rösing FW, Graw M, Marre B, Ritz-Timme S, Rothschild MA, Rotzsch K, Schmeling A, Schroder I, Geserick G. 2007. Recommendations for the forensic diagnosis of sex and age from skeletons. *Homo*, 58 (1):75-89.
- Rummeny E-J, Beer A. 2002. Ganzkörper-MR-Tomographie : 94 Tabellen. Stuttgart {[u.a.]: Thieme.
- Rummeny E-J, Reimer P, Heindel W. 2006. Ganzkörper-MR-Tomographie. Stuttgart {[u.a.]: Thieme.
- Schild H. 1997. MRI made easy. Berlin: Schering, Aktiengesellschaft.
- Schmeling A. 2004. Forensische Altersdiagnostik bei Lebenden im Strafverfahren.
- Schmeling A, Olze A, Reisinger W, Geserick G. 2000a. Medizinische Grundlagen der Altersschätzung bei Lebenden im Strafverfahren. *NJW*, 37:2720-2722.
- Schmeling A, Olze A, Reisinger W, Geserick G. 2001a. Der Einfluß der Ethnie auf die bei strafrechtlichen Altersschätzungen untersuchten Merkmale. *Rechtsmedizin*, 11 (3):78-81.
- Schmeling A, Reisinger W, Geserick G, Olze A. 2006. Age estimation of unaccompanied minors. Part I. General considerations. *Forensic Sci Int*, 159 Suppl 1:S61-64.
- Schmeling A, Geserick G, Reisinger W, Olze A. 2007. Age estimation. *Forensic Sci Int*, 165 (2-3):178-181.
- Schmeling A, Olze A, Reisinger W, Rösing FW, Geserick G. 2003. Forensic age diagnostics of living individuals in criminal proceedings. *Homo*, 54 (2):162-169.
- Schmeling A, Reisinger W, Loreck D, Vendura K, Markus W, Geserick G. 2000b. Effects of ethnicity on skeletal maturation: consequences for forensic age estimations. *Int J Legal Med*, 113 (5):253-258.
- Schmeling A, Schulz R, Reisinger W, Muhler M, Wernecke KD, Geserick G. 2004. Studies on the time frame for ossification of the medial clavicular epiphyseal cartilage in conventional radiography. *Int J Legal Med*, 118 (1):5-8.
- Schmeling A, Geserick G, Kaatsch HJ, Marre B, Reisinger W, Riepert T, Ritz-Timme S, Rösing FW, Rotzsch K. 2001b. [Recommendations for age determinants of living probands in criminal procedures]. *Anthropol Anz*, 59 (1):87-91.
- Schmeling A, Kaatsch HJ, Marré B, Reisinger W, Riepert T, Ritz-Timme S, Rösing FW, Röttscher K, Geserick G. 2001c. Arbeitsgemeinschaft für Forensische Altersdiagnostik der Deutschen Gesellschaft für Rechtsmedizin: Empfehlungen für die Altersdiagnostik bei Lebenden im Strafverfahren. *Rechtsmedizin*, 11:1.
- Schmeling A, Grundmann C, Fuhrmann A, Kaatsch HJ, Knell B, Ramsthaler F, Reisinger W, Riepert T, Ritz-Timme S, Rösing FW. 2008. Aktualisierte Empfehlungen der Arbeitsgemeinschaft für Forensische Altersdiagnostik für Altersschätzungen bei Lebenden im Strafverfahren. *Rechtsmedizin*, 18 (6):451-453.
- Schulz R, Muhler M, Reisinger W, Schmidt S, Schmeling A. 2008a. Radiographic staging of ossification of the medial clavicular epiphysis. *Int J Legal Med*, 122 (1):55-58.
- Schulz R, Zwiesigk P, Schiborr M, Schmidt S, Schmeling A. 2008b. Ultrasound studies on the time course of clavicular ossification. *Int J Legal Med*, 122 (2):163-167.

- Schulz R, Muhler M, Mutze S, Schmidt S, Reisinger W, Schmeling A. 2005. Studies on the time frame for ossification of the medial epiphysis of the clavicle as revealed by CT scans. *Int J Legal Med*, 119 (3):142-145.
- Tanner JM, Whitehouse RH. 1976. Clinical longitudinal standards for height, weight, height velocity, weight velocity, and stages of puberty. *Arch Dis Child*, 51 (3):170-179.
- Thali MJ, Dirnhofer R. 2004. Forensic radiology in German-speaking area. *Forensic Sci Int*, 144 (2-3):233-242.
- Thiemann H-H, Nitz I. 1986. Röntgenatlas der normalen Hand im Kindesalter. 1. Aufl.. Aufl. Leipzig: Thieme.
- Traumatology ISoOS 2009. Sternoclavicular Joint <http://www.orthogate.org>.
- Webb PA, Suchey JM. 1985. Epiphyseal union of the anterior iliac crest and medial clavicle in a modern multiracial sample of American males and females. *Am J Phys Anthropol*, 68 (4):457-466.
- Weishaupt D, Köchli VD, Marinécek B. 2001. Wie funktioniert MRI? : eine Einführung in Physik und Funktionsweise der Magnetresonanzbildgebung. 3., völlig überarb. Aufl.. Aufl. Berlin {[u.a.]}: Springer.
- Weishaupt D, Köchli VD, Marinécek B. 2006. Wie funktioniert MRI? : eine Einführung in Physik und Funktionsweise der Magnetresonanzbildgebung ; mit 9 Tabellen. 5. Aufl.. Aufl. Heidelberg: Springer.
- Zink C, Herborn CU. 2007. Klinikwörterbuch MRT. Berlin: ABW, Wiss.-Verl.

# Anhang

## Danksagung

An erster Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei Frau Dr. Rotraud Neumann bedanken, ohne die es diese Arbeit nicht gegeben hätte. Sie war zu jeder Tages- oder Nacht-, Dienst- oder Urlaubszeit bereit, mich in meinem Tun zu unterstützen und voranzubringen. Ebenso hat sie mir die Freiräume gelassen, selbstständig zu arbeiten und diese Promotion auch nach meinen eigenen Vorstellungen gestalten zu können.

Herrn Prof. Dr. med. Dipl.-Chem. Werner A. Kaiser möchte ich sowohl für die Möglichkeit, an seinem Institut und unter seiner Leitung promovieren zu können, als auch für die hilfreiche Kritik bei der Fertigstellung meiner Arbeit danken.

Darüber hinaus gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. Reichenbach, Institut für diagnostische und interventionelle Radiologie, Frau Dr. Arnold, Institut für Rechtsmedizin, und Herrn PD Dr. Hansch, Institut für diagnostische und interventionelle Radiologie, für ihre konstruktive Kritik und wertvollen Ratschläge beim Entstehen dieser Arbeit.

Dem Institut für Medizinische Statistik, Informatik und Dokumentation des Universitätsklinikums Jena danke ich für die wertvollen Ratschläge zur statistischen Auswertung der Ergebnisse.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern, Anneliese und Ottmar Hollnberger, die mich in der dritten Klasse davon abgehalten haben, Handarbeitslehrerin zu werden, und mir seitdem, nicht nur durch ihre finanzielle Unterstützung, ermöglicht haben, alles zu erreichen, was ich mir bis jetzt erhofft hatte.

Nicht zuletzt möchte ich meinem lieben Freund Peter danken. Er war die beste Unterstützung, die man sich für ein so unberechenbares Vorhaben wie eine Promotion nur wünschen kann. Er hat seine kostbare Freizeit geopfert, um für mich und meine Probleme da zu sein. Danke Peter, für Deine Zeit, Deine Geduld und Deine Liebe.



## **Ehrenwörtliche Erklärung**

Hiermit erkläre ich, dass mir die Promotionsordnung der Medizinischen Fakultät der Friedrich-Schiller-Universität bekannt ist, ich die Dissertation selbst angefertigt habe und alle von mir benutzten Hilfsmittel, persönlichen Mitteilungen und Quellen in meiner Arbeit angegeben sind, mich folgende Person bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts unterstützt hat: Frau Dr. Rotraud Neumann, die Hilfe eines Promotionsberaters nicht in Anspruch genommen wurde und dass Dritte weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen von mir für Arbeiten erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen, dass ich die Dissertation noch nicht als Prüfungsarbeit für eine staatliche oder andere wissenschaftliche Prüfung eingereicht habe und dass ich die gleiche, eine in wesentlichen Teilen ähnliche oder eine andere Abhandlung nicht bei einer anderen Hochschule als Dissertation eingereicht habe.

Jena, den 12.01.2011